

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Edi-Eduard Barić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
doc.dr.sc. Ivica Garašić

Student:
Edi-Eduard Barić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se docentu dr.sc. Ivici Garašiću i asistentici dr.sc. Maji Jurici na svesrdnoj pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije, Laboratorija za zaštitu materijala, Laboratorija za strojnu obradu, Laboratorija za toplinsku obradu, Laboratorija za materijalografiju te Laboratorija za mehanička ispitivanja koji su pomogli u izradi eksperimenta.

Zahvaljujem se Tvornici turbina Karlovac i gospodinu Novoselu na ustupljenom osnovnom i dodatnom materijalu bez kojih izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Posebno bih se zahvalio svojoj obitelji, djevojci, prijateljima i kolegama na podršci i motivaciji tijekom cjelokupnog studiranja.

Edi Barić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **EDI EDUARD BARIĆ**

Mat. br.: **0035178503**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARLJIVOST MARTENZITNOG ČELIKA X3CrNiMo13-4**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDABILITY OF X3CrNiMo13-4 MARTENSITIC STEEL**

Opis zadatka:

Dati pregled i analizirati zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika sa posebnim naglaskom na martenzitne čelike. Pojasniti osnovne probleme koji se mogu pojaviti pri zavarivanju ovih čelika u proizvodnim uvjetima. Specificirati primjenjive postupke zavarivanja i dodatne materijale te dati osnovne smjernice za provedbu toplinske obrade nakon zavarivanja. Dati neke primjere primjene martenzitnih čelika u industrijskoj proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za osnovni materijal X3CrNiMo13-4 razraditi plan eksperimenta te definirati tehnologiju zavarivanja za TIG i REL postupak. Posebno detaljno odrediti razine unosa topline, predgrijavanja i toplinske obrade. Na zavarenim uzorcima provesti potrebna mehanička i mikrostrukturna ispitivanja te odrediti postignutu kvalitetu zavarenih spojeva. Donijeti zaključke o propisanoj tehnologiji zavarivanja i dati preporuke za primjenu u proizvodnji.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

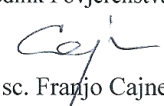
Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA	VI
POPIS KRATICA.....	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI.....	2
2.1. Zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika.....	4
2.1.1. Feritni nehrđajući čelici i njihova zavarljivost.....	5
2.1.2. Austenitni nehrđajući čelici i njihova zavarljivost.....	8
2.1.3. Dupleks nehrđajući čelici i njihova zavarljivost.....	12
3. MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK	14
3.1. Standardne vrste martenzitnih nehrđajućih čelika	16
3.2. Formiranje mikrostrukture	17
3.3. Toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika	19
3.3.1. Austenitizacija.....	20
3.3.2. Gašenje.....	20
3.3.3. Duboko hlađenje	21
3.3.4. Visokotemperaturno popuštanje	22
3.3.5. Sferoidizacijsko (meko) žarenje	23
3.4. Mekomartenzitni čelici	24
4. ZAVARIVANJE MARTENZITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA.....	29
4.1. Mikrostruktura zavara.....	29

4.2. Dodatni materijali	32
4.3. Toplinske obrade kod zavarivanja	32
4.3.1. Predgrijavanje, međuprolazna temperatura i dogrijavanje	32
4.3.1.1. Savjeti i smjernice za predgrijavanje martenzitnih čelika	34
4.3.2. Naknadna toplinska obrada.....	35
4.4. Pukotine	36
4.4.1. Kristalizacijske i likvacijske pukotine	36
4.4.2. Pukotine uzrokovane ponovnim zagrijavanjem.....	37
4.4.3. Vodikove pukotine.....	37
4.5. REL postupak zavarivanja	38
4.5.1. Prednosti i nedostaci REL zavarivanja [23].....	39
4.5.2. Parametri REL zavarivanja	39
4.6. TIG postupak zavarivanja.....	41
4.6.1. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja [27]	42
4.6.2. Parametri TIG zavarivanja.....	43
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	45
5.1. Osnovni materijal.....	46
5.2. Dodatni materijal i zaštitni plin.....	47
5.3. Zavarivanje ploča.....	48
5.3.1. Priprema spoja	49
5.3.2. Predgrijavanje	50
5.3.3. Zavarivanje različitih uzoraka.....	51
5.3.3.1. Uzorak 1.....	52
5.3.3.2. Uzorak 2.....	53
5.3.3.3. Uzorak 3.....	54

5.4. Toplinska obrada nakon zavarivanja	56
5.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva	57
5.5.1. Izrada uzoraka za ispitivanje.....	57
5.5.2. Statičko vlačno ispitivanje	58
5.5.3. Ispitivanje savijanjem	61
5.5.4. Geometrijska analiza makroizbrusaka	63
5.5.5. Mjerenje tvrdoće zavarenog spoja	69
6. ZAKLJUČAK	73
7. LITERATURA	74

POPIS SLIKA

Slika 1 Rotor Ossberger turbine[1]	1
Slika 2 Prikaz mikrostruktura različitih grupa čelika [3].....	2
Slika 3 Schaefflerov dijagram [3]	3
Slika 4 Suvremena definicija zavarljivosti [5].....	4
Slika 5 Fazni dijagram za sustav Fe – Cr [14]	17
Slika 6 Pseudobinarni dijagram za trojni sustav Fe-Cr-C s 13 % Cr [14]	18
Slika 7 Dijagram gašenja Cr – Ni čelika [16]	21
Slika 8 Dijagram toplinske obrade martenzitnih nehrđajućih čelika [18]	22
Slika 9 Dijagram žarenja martenzitnih čelika [11]	23
Slika 10 TTA dijagram [11].....	25
Slika 11 Strukture popuštanja čelika s 14 %Cr, 5 %Ni i 1,5 %Mo [11].....	26
Slika 12 4 područja ZUT-a [14].....	30
Slika 13 Fe-Cr-C pseudobinarni fazni dijagram za martenzitni čelik s 12% Cr [14]	31
Slika 14 Dijagram toplinskih operacija tijekom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [14]	
.....	36
Slika 15 Shematski prikaz REL zavarivanja[24]	38
Slika 16 Shematski prikaz TIG zavarivanja [26]	41
Slika 17 (a) Izvor struje za zavarivanje CastoTig 3002, (b) Identifikacijska pločica izvora struje	
.....	48
Slika 18 Skica pripreme zavarenog spoja	49
Slika 19 Dimenzije ploča	50
Slika 20 Predgrijavanje plinskim plamenom	51
Slika 21 Shematski prikaz slaganja prolaza prilikom zavarivanja.....	52
Slika 22 Uzorak 1 fiksiran prije početka zavarivanja	52
Slika 23 (a) Uzorak 3 nakon posljednjeg prolaza, (b) Grafički prikaz unosa topline u zavar	55
Slika 24 Dijagram toplinske obrade.....	56
Slika 25 Pozicije izrezivanja uzoraka (1 – odbacivanje 25 mm, 2 – smjer zavarivanja, 3,5 –	
epruvete za statički vlačni pokus, 6 – makroizbrusak) [31].....	57
Slika 26 Kidalica EU 40 mod s epruветom.....	58

Slika 27 Ispitne epruvete prije i nakon provođenja ispitivanja.....	59
Slika 28 Dijagram „sila - produljenje“ za epruvetu 1	60
Slika 29 Dijagram „sila - produljenje“ za epruvetu 3	60
Slika 30 Postupak savijanja prema DIN EN 910 [33]	61
Slika 31 Makroizbrusak uzorka1	63
Slika 32 Makroizbrusak uzorka 2	64
Slika 33 Makroizbrusak uzorka 3	64
Slika 34 Makroizbrusak uzorka 1 s kotama.....	65
Slika 35 Makroizbrusak uzorka 2 s kotama.....	65
Slika 36 Makroizbrusak uzorka 3 s kotama.....	66
Slika 37 Grafički prikaz širina lica zavara.....	67
Slika 38 Grafički prikaz nadvišenja lica zavara.....	68
Slika 39 Grafički prikaz širine ZUT-a	68
Slika 40 Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju	69
Slika 41 Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća lica zavara.....	72
Slika 42 Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća korijena zavara	72

POPIS TABLICA

Tablica 1 Standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8].....	6
Tablica 2 Utjecaj pojedinih elemenata na austenitni nehrđajući čelik [9]	9
Tablica 3 Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8]...	11
Tablica 4 Standardne vrste dupleks nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8]	13
Tablica 5 Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8]	16
Tablica 6 Temperature gašenja i popuštanja nekih mekomartenzitnih čelika [19]	27
Tablica 7 Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13–4 te dozvoljene vrijednosti [28]	46
Tablica 8 Mehanička svojstva čelika X3CrNiMo13-4 [28].....	46
Tablica 9 Mehanička svojstva zavara [29].....	47
Tablica 10 Kemijski sastav metala zavara [29]	47
Tablica 11 Parametri zavarivanja uzorka 1	53
Tablica 12 Parametri zavarivanja uzorka 2	54
Tablica 13 Parametri zavarivanja uzorka 3	54
Tablica 14 Vrijednosti dobivene statičkim vlačnim pokusom.....	59
Tablica 15 Rezultati ispitivanja na savijanje	62
Tablica 16 Geometrijske značajke makroizbrusaka	66
Tablica 17 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 1	69
Tablica 18 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 2.....	70
Tablica 19 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 3.....	70

POPIS KRATICA

ISO	International Organization for Standardization
HRN	Hrvatska norma
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europska norma
ZUT	Zona utjecaja topline
MZ	Metal zavara
ZT	Zona taljenja
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
MAG	Elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
MIG	Elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
TIG	Elektrolučni postupak zavarivanja s netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
M _s	Temperatura početka martenzitne pretvorbe
M _f	Temperatura završetka martenzitne pretvorbe
A	Austenit
F	Ferit
M	Martenzit
IKK	Interkristalna korozija
BCC	Prostorno centrirana kubna rešetka
FCC	Plošno centrirana kubna rešetka
A _z	Zaostali austenit
TTT	Time Temperature Transformation
DCEN	Direct Current Electrode Negative
DCEP	Direct Current Electrode Positive
AC	Alternate current
DC	Direct current

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
Ni_{ekv}	Ekvivalent nikla	%
Cr_{ekv}	Ekvivalent kroma	%
Q	Unos topline u zavar	kJ/mm
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm ²
$R_{p0.2}$	Granica razvlačenja	N/mm ²
ϑ_p	Temperatura popuštanja	°C
ϑ_a	Temperatura austenitizacije	°C
t_p	Trajanje popuštanja	h
A	Istezljivost	%
HV	Mjerenje tvrdoće prema Vickersu	-
HB	Mjerenje tvrdoće prema Brinellu	-
T_p	Temperatura predgrijavanja	°C
$d_{\dot{z}}$	Promjer žice za zavarivanje	mm
d_e	Promjer elektrode za REL zavarivanje	mm
I_z	Jakost struje zavarivanja	A
U	Napon električnog luka	V
v_z	Brzina zavarivanja	cm/min
k	Stupanj iskoristivosti el. Luka	-
a	Širina zavora	mm
b	Nadvišenje zavora	mm
c	Širina ZUT-a	mm

SAŽETAK

U ovom radu analiziran je utjecaj unosa topline, predgrijavanja i toplinske obrade na zavarljivost čelika X3CrNiMo13-4.

U teorijskom dijelu dan je kratak pregled visokolegiranih nehrđajućih čelika uz analizu njihove zavarljivosti. Detaljnije su pojašnjeni martenzitni i mekomartenzitni nehrđajući čelici, njihova proizvodnja, zavarljivost i toplinske obrade u procesu zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje ploča čelika X3CrNiMo13-4. Zavarena su 3 zavarena spoja, svaki sa različitom temperaturom predgrijavanja. Nakon zavarivanja, ploče su toplinski obrađene te su izrezane epruvete za mehanička ispitivanja i makro analizu.

Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem doneseni su zaključci o zavarljivosti čelika X3CrNiMo13-4.

Ključne riječi: Martenzitni nehrđajući čelik, predgrijavanje, zavarljivost.

SUMMARY

This paper analyzes the influence of heat input, preheating and post weld heat treatment on weldability of steel X3CrNiMo13-4.

The theoretical part gives a short overview of stainless steels and their weldability. Martensitic and softmartensitic steels with their production, weldability and heat treatment in the process of welding are thoroughly explained.

In the experimental part of this paper, welding of X3CrNiMo13-4 steel plates was carried out. 3 Welded joints were made, each with different preheat temperature. After the welding, plates were heat treated and test samples for mechanical tests and macro analysis were cut out.

Analyzing the results obtained by testing, the conclusions on weldability of steel X3CrNiMo13-4 were adopted.

Key words: Martensitic stainless steel, preheating, weldability.

1. UVOD

Zavarivanje je postupak koji ima značajnu ulogu tijekom izradbe i oblikovanja raznih konstrukcija i proizvoda načinjenih iz metalnih i nemetalnih materijala. Kao i kod ostalih metoda spajanja, cilj zavarivanja je osigurati kompaktni, siguran spoj koji će bez poteškoća izdržati naprezanja koja su nekim projektom predviđena.

Zavarivanje je postupak spajanja, primjenjiv za gotovo sve vrste materijala koje čovjek danas poznaje, međutim čelik i željezne legure su zbog svoje relativno niske cijene i dalje primarni materijali za izradu nekog proizvoda. Gotovo da ne postoji proizvod izrađen od metala u čijoj proizvodnji se nije koristilo zavarivanje.

Martenzitni nehrđajući čelici su materijali s dobrom zavarljivošću, no ipak je potrebno pridržavati se određenih uputa i pravila kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta spoja bez grešaka. Zbog povoljnog omjera cijene i mehaničkih svojstava, ovaj tip čelika najčešće se primjenjuje kod izrade rotora vodenih turbina. Na slici 1 prikazan je rotor ossberger turbine, čije su lopatice izrađene od martenzitnog čelika.



Slika 1 Rotor Ossberger turbine[1]

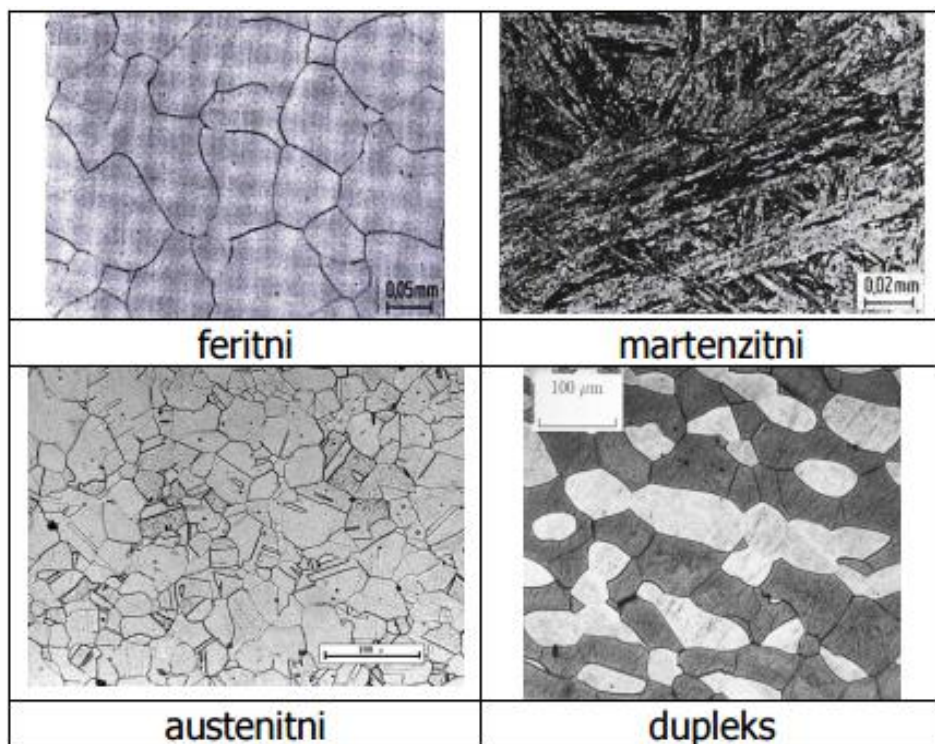
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

U osnovi se nehrđajući čelici temelje na Fe-Cr, Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sustavima, ali mogu sadržavati i dodatne legirne elemente koji poboljšavaju njihova svojstva i mijenjaju mikrostrukturu. Korozijska otpornost nehrđajućih čelika prvenstveno proizlazi iz legiranja kromom i to u udjelima većim od 12 %. Ovaj udio kroma jamči stvaranje zaštitnog oksidnog sloja na površini čelika. Osim toga, materijal postaje plemenitiji, što ga čini otpornijim na djelovanje elektrolita.

Nehrđajući čelici mogu se podijeliti u 4 grupe prema različitim mikrostrukturnim obilježjima [2]:

1. feritni nehrđajući čelik;
2. austenitni nehrđajući čelici;
3. austenitno – feritni (dupleks) nehrđajući čelici i
4. martenzitni nehrđajući čelici.

Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa prikazane su na slici 2 [3].



Slika 2 Prikaz mikrostrukture različitih grupa čelika [3]

Kako bi se općenito opisao utjecaj sastava čelika na njegovu mikrostrukturu uvedeni su nikal (Ni_{ekv}) i krom (Cr_{ekv}) ekvivalenti koji obuhvaćaju i utjecaj ostalih legirnih elemenata u određenom čeliku.

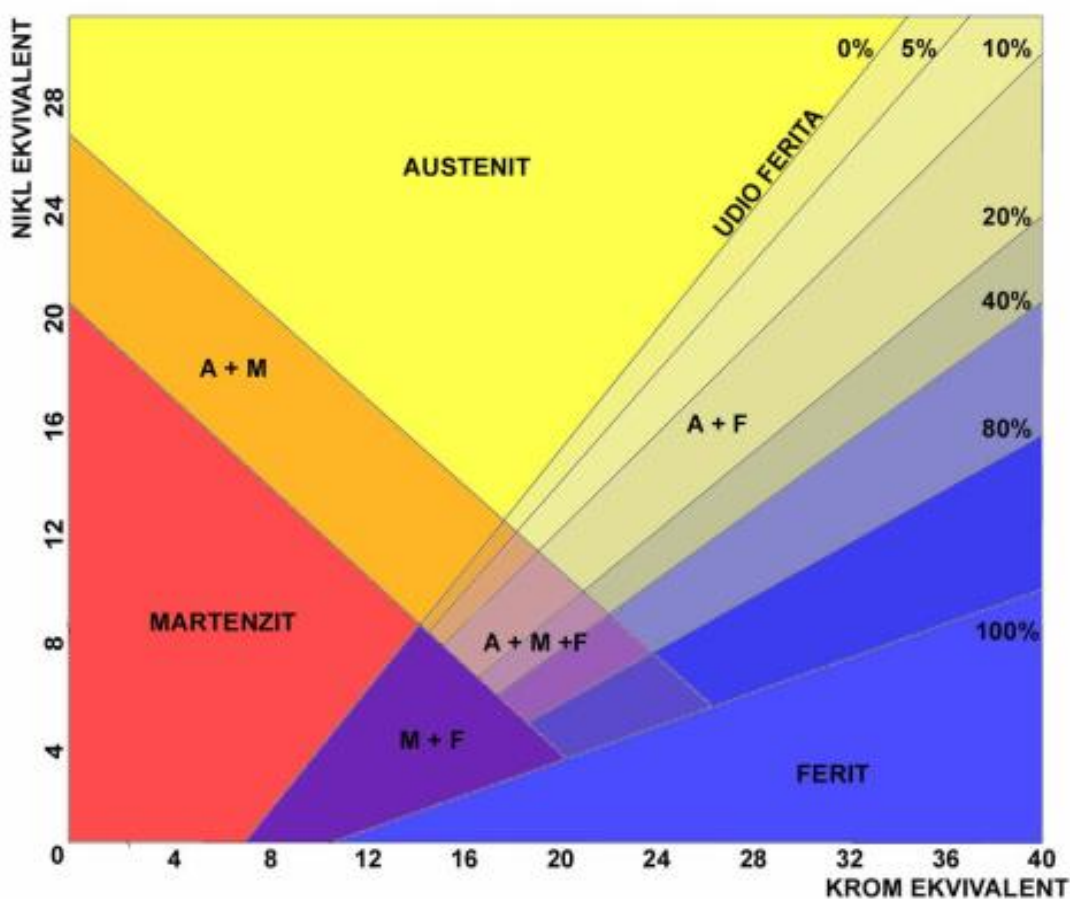
Cr_{ekv} – izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (α – geni elementi),

$$Cr_{ekv} = \% Cr + 1,5 \% Si + \% Mo + 0,5 \% (Ta + Nb) + 2 \% Ti + \% W + \% V + \% Al.$$

Ni_{ekv} – izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita (γ – geni elementi),

$$Ni_{ekv} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn + 0,5 \% Co.$$

Uz pomoć izračunatih nikal i krom ekvivalenata i Schaefflerovog dijagrama prikazanog na slici 3 jednostavno se može vidjeti kakvu strukturu pojedini čelik sadrži.



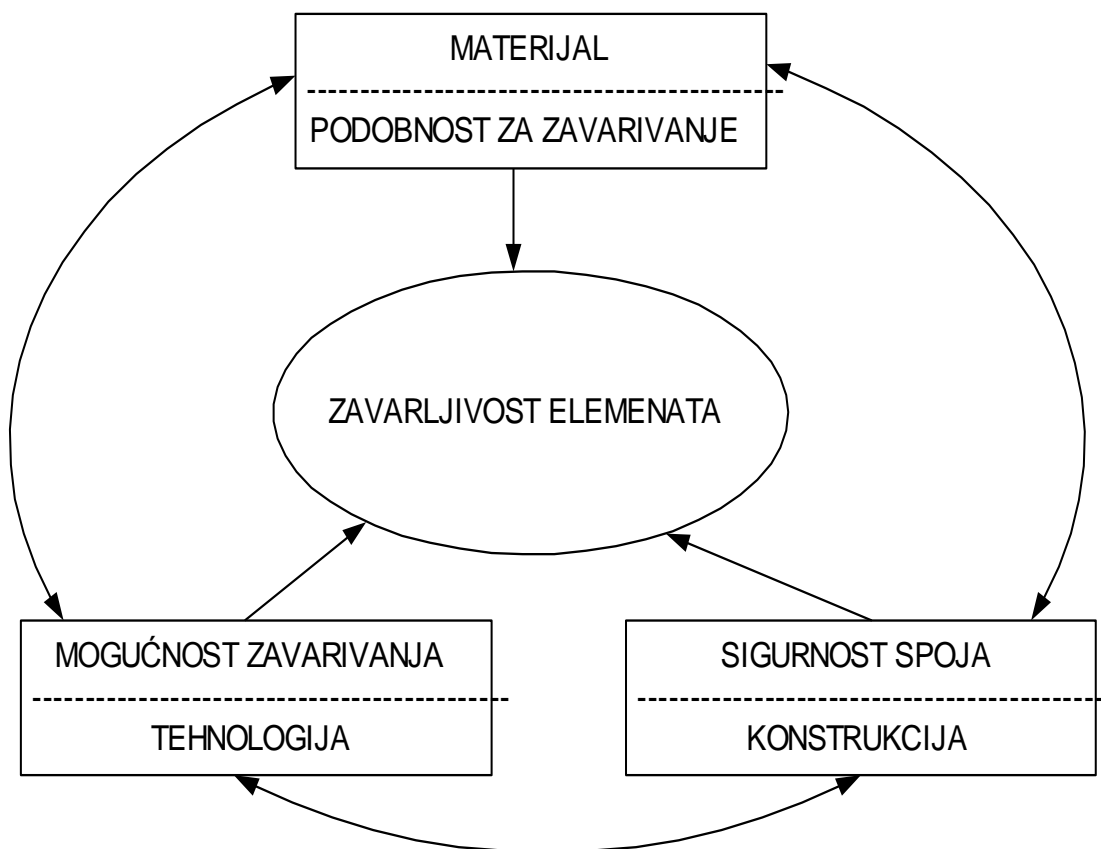
Slika 3 Schaefflerov dijagram [3]

2.1. Zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika

Postoji više definicija zavarljivosti, a najčešće se koristi definicija koju je dao Međunarodni institut za zavarivanje. Ova definicija usvojena je i od Međunarodne organizacije za standardizaciju ISO:

“Metalni materijal smatra se zavarljivim u određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se kontinuitet materijala ostvaruje zavarenim spojem izvedenim pod uvjetima predviđenim za ostvarivanje tog stupnja zavarljivosti. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio [4].“

Na slici 4 dan je prikaz suvremene definicije zavarljivosti, koja se definira kroz materijal, sigurnost zavarenog spoja te mogućnosti zavarivanja.



Slika 4 Suvremena definicija zavarljivosti [5]

U definiciju materijala ulaze kemijski sastav, metalurška svojstva materijala koja prvenstveno ovise o proizvodnji materijala te fizikalna odnosno mehanička svojstva materijala. U pogledu sigurnosti zavarenog spoja posebna pažnja se posvećuje konstrukcijskom obliku zavarivanog spoja, vrstama i veličini naprezanja, debljini elemenata, radnim temperaturama te okolnoj atmosferi. Mogućnost zavarivanja obuhvaća elemente kao što su: priprema za zavarivanje koja uključuje određivanje temperature predgrijavanja, kemijskog sastava, debljine i dr. Uz to mogućnost zavarivanja obuhvaća postupke i parametre izvođenja zavarivanja te naknadnu toplinsku obradu [6].

Za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti koristi se niz metoda od kojih svaka služi samo za određivanje nekih svojstava iz definicije zavarljivosti.

2.1.1. Feritni nehrđajući čelici i njihova zavarljivost

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno 11 % - 17 % Cr i $< 0,1$ % C i zbog toga zadržavaju feritnu strukturu pri gotovo svim temperaturama pa se ne mogu lako zakaliti. Često im se još dodaje Mo kako bi se povećala korozijska postojanost, a Ti i Nb kako bi zavarljivost bila bolja. Udio Cr može doseći i do 30 %. U tablici 1 prikazane su standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika.

Ferit kao strukturna faza nastaje pri samom početku skrućivanja i do potpunog ohlađivanja nema nikakvih transformacija. Uobičajena struktura ovih čelika zbog prisutnosti ferita i male količine martenzita koji nastaje pri brzom ohlađivanju sastoji se samo od ferita i karbida.

S obzirom da kod ovih čelika obično ne dolazi do transformacija te pri brzom hlađenju do zakaljivanja, može se steći dojam kako su dobro zavarljivi. Međutim, i pri zavarivanju ovih čelika javljaju se određene poteškoće.

Prilikom zagrijavanja feritnih čelika na temperature više od 850 °C dolazi do porasta zrna, što predstavlja najveći nedostatak ovih čelika pri zavarivanju. Ova pojava je najizraženija u području zone utjecaja topline (ZUT-a). Povećanje zrna odvija se veoma brzo, pa se u ovim čelicima mogu naći neobično velika zrna [7].

Tablica 1 Standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X2CrNi12	1.4003	0,030	1,00	1,50	0,040	0,015	0,030	10,5/12,5	-	0,30/1,00	-
X2CrTi12	1.4512	0,030	1,00	1,00	0,040	0,015	-	10,5/12,5	-	-	Ti: 6(C+N)/0,65
X6CrNiTi12	1.4516	0,08	0,70	1,50	0,040	0,015	-	10,5/12,5	-	0,50/1,50	Ti: 0,05/0,35
X6Cr13	1.4000	0,08	1,00	1,00	0,040	0,015	-	12,0/14,0	-	-	-
X6CrAl13	1.4002	0,08	1,00	1,00	0,040	0,015	-	12,0/14,0	-	-	Al: 0,10/0,30
X6Cr17	1.4016	0,08	1,00	1,00	0,040	0,015	-	16,0/18,0	-	-	-
X3CrTi17	1.4510	0,05	1,00	1,00	0,040	0,015	-	16,0/18,0	-	-	Ti: 4(C+N)+0,15/0,80
X3CrNb17	1.4511	0,05	1,00	1,00	0,040	0,015	-	16,0/18,0	-	-	Nb :12C/1,00
X6CrMo17-1	1.4113	0,08	1,00	1,00	0,040	0,015	-	16,0/18,0	0,90/1,40	-	-
X2CrMoTi18-2	1.4521	0,025	1,00	1,00	0,040	0,015	0,030	17,0/20,0	1,80/2,50	-	Ti: 4(C+N)+0,15/0,80

Feritni čelici su uobičajeno fino zrnati uz relativno dobru istezljivost. No ukoliko dođe do pogrubljenja zrna, prijelazna temperatura udarne žilavosti se povisi znatno iznad sobne temperature, što znači da na sobnoj temperaturi materijal postaje veoma krhak.

Zbog karakteristike ovih čelika da pri zagrijavanju i hlađenju ne dolazi do faznih transformacija, nakon što materijal postane grubozrnat, nemoguće ga je toplinskom obradom vratiti nazad u prvobitnu fino zrnatu strukturu. Da bi se porast zrna spriječio, zavarivanje treba izvoditi na takav način da osnovni materijal koji se nalazi neposredno uz zavar, što kraće bude izložen temperaturama iznad 1150 °C. Ovo se može postići izborom postupka zavarivanja koji će dati mali unos topline, a time i brzo hlađenje, kao što su REL, MAG, EPP i sl.

Teoretski se grubozrnata struktura ZUT-a može poboljšati deformacijom metala u toplom stanju, zagrijavanjem i čekićanjem prijelazne zone. Ova metoda nije uvijek moguća, a i sam efekt čekićanja nije uvijek pouzdan, pa se zbog toga i ne preporučuje. Potrebno je naglasiti kako se ni u kojem slučaju ne smije primijeniti čekićanje neugrijanog metala, jer može doći do pojave pukotina.

Sklonost čelika pogrubljenju zrna može se smanjiti dodavanjem manje količine dušika u sastav čelika. Dodavanjem dušika u metal zavora, doći će do skrućivanja u sitno zrnatu strukturu. Osim

toga, preporuča se zavarivanje s dodatnim materijalom austenitnog tipa, npr. 18/8 (18 % Cr, 8% Ni).

Problem prilikom zavarivanja ove grupe čelika predstavlja i stvaranje σ – faze, koja je intermetalni spoj kroma i željeza velike tvrdoće, krhkosti, a često i slabe otpornosti na koroziju. Osim toga, moguća je i pojava izlučivanja Cr karbida, a pri dugotrajnom zagrijavanju na temperaturi između 400 °C i 540 °C, može doći do pojave tzv. “krhkosti 475”.

Predgrijavanje na oko 200 °C može se koristiti pri zavarivanju feritnih čelika s visokim sadržajem kroma i relativno visokim sadržajem ugljika (0.25 C %). U ostalim slučajevima se normalno ne primjenjuje za ove čelike. Ukoliko je potrebno provesti predgrijavanje osnovnog materijala poželjno je da zagrijavanje i sam rad budu na temperaturi iznad M_s temperature tj. iznad početka martenzitne pretvorbe, počevši od pripajanja pa na dalje. Ako se kojim slučajem dogodi da se u postupku zavarivanja dogodi pothlađivanje ispod M_f temperature, tj. ispod završetka martenzitne pretvorbe, stvorit će se krhka martenzitna struktura u zoni taljenja i ZUT-u.

Odžarivanje na temperaturi 750 °C - 850 °C i nakon toga brzo hlađenje povećava istezljivost prijelazne zone i poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju.

Ravnanje i hladne deformacije zavarenih dijelova treba izvoditi nakon zagrijavanja na 300 °C – 400 °C, jer je istezljivost pri ovim temperaturama znatno viša [9].

Feritni nehrđajući čelici primjenjuju se na mjestima gdje je otpornost na koroziju važnija od mehaničkih svojstava (čvrstoće, žilavosti i istezljivosti). Vrste s nižim udjelom kroma primjenjuju se za ispušne sustave automobila zbog bolje otpornosti na opću koroziju u odnosu na ugljične čelike. Vrste s većim udjelom kroma primjenjuju se u uvjetima veće korozijske agresije, za dekorativne elemente u arhitekturi i automobilsku opremu. Feritni čelici s najvišim udjelom kroma primjenjuju se u kemijsko procesnoj industriji, u industriji celuloze i papira te u rafinerijama. Posjeduju bolju korozijsku postojanost od austenitnih i martenzitnih čelika. Međutim, relativno su skupi i teško se obrađuju [10].

2.1.2. Austenitni nehrđajući čelici i njihova zavarljivost

Austenitni nehrđajući čelici su zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti te mehaničkih svojstava najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Svoju primjenu našli su u svim granama industrije i građevinarstvu [3].

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02 % – 0,15 % C, 15 % – 20 % Cr, 7 % – 20 % Ni, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija, tantala, dušika. Najpoznatiji predstavnik ove grupe čelika je čelik Cr-Ni (18/8), a legiranjem su razvijene ostale legure. Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. U tablici 2 je prikazan utjecaj pojedinih legirnih elemenata na čelik, a u tablici 3 dan je popis standardnih vrsta austenitnih čelika.

Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje dubokim hlađenjem ili hladnom deformacijom. Međutim, mikrostruktura ove skupine nehrđajućih čelika prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna [11].

Tablica 2 Utjecaj pojedinih elemenata na austenitni nehrđajući čelik [9]

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati Cr_{23}C_6 i uzrokovati interkristalnu koroziju.
Cr	F	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni. (γ -gen).
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.
Nb		Dodaje se čeliku min $\text{Nb} \geq 8 \times \% \text{C}$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	A	Spriječava vruće pukotine stvaranjem manganovog sulfida (MnS).
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita (α - gen).
P, S, Se	-	Olakšava obradu odvajanjem čestica. Pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji) Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranje ferita.
Ti	-	Dodaje se čeliku $\text{Ti} \geq 5 \times \% \text{C}$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita.

Austenitni nehrđajući čelici smatraju se lakše zavarljivim od ostalih skupina korozijski postojanih Cr-Ni čelika iz razloga što kod njih ne nastupaju velike fazne (metalurške) transformacije. Zbog toga je moguće postići zavarene spojeve koji posjeduju svojstva slična onima osnovnog materijala i bez prethodnog zagrijavanja ili pak naknadne toplinske obrade. No i kod ovih konstrukcijskih materijala zahtjeva se odgovarajuća tehnološka razina i disciplina, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću ka deformacijama kao posljedica zavarivanja.

Ova grupa čelika nije sklona povećanju zrna u ZUT-u, a za razliku od ostalih vrsta čelika ima znatno veću žilavost i istezljivost koju zadržava i na sniženim temperaturama.

Najveći problem prilikom zavarivanja ove grupe čelika predstavlja pojava senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 °C do 850 °C. Izlučeni karbidi sprječavaju dislokaciju atoma na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što smanjuje istezljivost i žilavost austenitne strukture. Ako je prisutan agresivan medij u eksploataciji, tada će uz granice zrna doći do interkristalne korozije, jer nema dovoljno Cr, koji je migrirao na granicu zrna tvoreći Cr_{23}C_6 s 94,3 % Cr [9].

Izlučivanje karbida odnosno pojava interkristalne korozije može se spriječiti [9]:

1. Legiranjem elementima karbidotvorcima Nb, Ti, Ta,
2. Smanjenjem sadržaja ugljika,
3. Toplinskom obradom gašenja i
4. Malim unošenjem topline tijekom zavarivanja.

Prilikom zavarivanja postoji mogućnost izlučivanja sigma (σ) i hi (χ) faze, koje nepovoljno djeluju na zavareni spoj radi smanjenja žilavosti i istezljivosti, a i smanjenja korozijske otpornosti.

Također, problem mogu predstavljati i tople pukotine kao posljedica unošenja nečistoća, posebno sumpora i fosfora u metal zavara. Prilikom hlađenja zavarenog spoja, a zbog djelovanja naprezanja, dolazi do nastajanja toplih pukotina na mjestima gdje se nalaze nečistoće. Nečistoće su zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. Dakle, u ZUT-u ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, ali zbog omekšavanja ili taljenja tankih slojeva filma nečistoće, dolazi do pada čvrstoće po granicama zrna [9].

Tablica 3 Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X10CrNi18-8	1.4310	0,05/0,15	2,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	16,0/19,0	0,80	6,0/9,5	-
X2CrNi18-7	1.4318	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,10/0,2 0	16,5/18,5	-	6,0/8,0	-
X2CrNi18-9	1.4307	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	17,5/19,5	-	8,0/10,5	-
X2CrNi19-11	1.4306	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	18,0/20,0	-	10,0/12,0	-
X2CrNi18-10	1.4311	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,12/0,2 2	17,5/19,5	-	8,5/11,5	-
X5CrNi18-10	1.4301	0,07	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	17,5/19,5	-	8,0/10,5	-
X8CrNiS18-9	1.4305	0,10	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,15/0,3 5	0,11	17,0/19,0	-	8,0/10,0	Cu: 1,00
X6CrNiTi18-10	1.4541	0,08	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	-	17,0/19,0	-	9,0/12,0	Ti: 5C/0,70
X4CrNi18-12	1.4303	0,06	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	17,0/19,0	-	11,0/13,0	-
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	16,5/18,5	2,00/2,5 0	10,0/13,0	-
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,12/0,2 2	16,5/18,5	2,00/2,5 0	10,0/12,0	-
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	0,07	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	16,5/18,5	2,00/2,5 0	10,0/13,0	-
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	0,08	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	-	16,5/18,5	2,00/2,5 0	10,5/13,5	Ti: 5C/0,70
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	16,5/18,5	2,50/3,0 0	10,5/13,0	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,11	17,0/19,0	2,50/3,0 0	12,5/15,0	-
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	0,030	1,0 0	2,0 0	0,04 5	0,015	0,12/0,2 2	16,5/18,5	4,0/5,0	12,5/14,5	-
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	0,020	0,7 0	2,0 0	0,03 0	0,010	0,15	19,0/21,0	4,0/5,0	24,0/26,0	Cu: 1,20/2,0 0

2.1.3. Dupleks nehrđajući čelici i njihova zavarljivost

Ova skupina čelika specifična je po tome što ima dvofaznu strukturu koja se sastoji otprilike od 40 % - 60 % ferita, a ostalo je austenit. Legirani su uglavnom s 18 % - 27 % Cr, 5 % - 8 % Ni, te s 1 % - 4 % Mo. Svoju primjenu pronašli su u brodogradnji, offshore tehnici, naftnoj industriji, postrojenjima za desalinizaciju morske vode, papirnoj industriji i sl.

Dupleks čelici posjeduju povećanu otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida, a imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Čvrstoća ovih čelika je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika.

Prilikom zavarivanja treba paziti na unos topline koji mora iznositi više od 0,5 kJ/mm iz razloga da se izbjegne formiranje prevelikih količina ferita u zoni utjecaja topline. Nakon što materijal zagrijavanjem dođe u fazu ferita, ferit se tijekom brzog ohlađivanja ne uspije transformirati natrag u austenit, što štetno djeluje na zavareni spoj. Povećani udio feritne strukture dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura te do smanjenja korozijske postojanosti. Ova pojava je izraženija u ZUT-u nego u zoni metala zavara iz razloga što se svojstva metala zavara mogu kontrolirati izborom povoljnog dodatnog materijala.

Zavarivanje je potrebno izvoditi u kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline, jer dovoljna količina unesene topline i sporo hlađenje osigurava da kod kristalizacije i skrućivanja dođe do naknadne austenitizacije čelika čime se postižu tražena svojstva dupleks čelika [3,12].

U tablici 4 popis je najčešće korištenih dupleks čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8].

Tablica 4 Standardne vrste duplex nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [8]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X2CrNiN23-4	1.4362	0,030	1,00	2,00	0,03 5	0,01 5	0,05/0,2 0	22,0/24, 0	0,10/0,6 0	3,5/5,5	Cu 0,10/0,6 0
X2CrNiMoN 22-5-3	1.4462	0,030	1,00	2,00	0,03 5	0,01 5	0,10/0,2 2	21,0/23, 0	2,50/3,5 0	4,5/6,5	-
X2CrNiN22-2	1.4062	0,030	1,00	2,00	0,04 0	0,01 0	0,16/0,2 8	21,5/24, 0	0,45	1,00/2,9 0	-
X2CrNiCuN 23-4	1.4655	0,030	1,00	2,00	0,03 5	0,01 5	0,05/0,2 0	22,0/24, 0	0,10/0,6 0	3,5/5,5	Cu: 1,00/3,0 0
X2CrMnNiN21 -5-1	1.4162	0,040	1,00	4,0/6, 0	0,04 0	0,01 5	0,20/0,2 5	21,0/22, 0	0,10/0,8 0	1,35/1,9 0	Cu: 0,10/0,8 0
X2CrMnNiMo N 21-5-3	1.4482	0,030	1,00	4,0/6, 0	0,03 5	0,03 0	0,05/0,2 0	19,5/21, 5	0,10/0,6 0	1,50/3,5	Cu: 1,00
X2CrNiMnMo Cu N24-4-3-2	1.4662	0,030	0,70	2,50/ 4,0	0,03 5	0,00 5	0,20/0,3 0	23,0/25, 0	1,00/2,0 0	3,0/4,5	Cu; 0,10/0,8 0
X2CrNiMoN 29-7-2	1.4477	0,030	0,50	0,80/ 1,50	0,03 0	0,01 5	0,30/0,4 0	28,0/30, 0	1,50/2,6 0	5,8/7,5	Cu: 0,80
X2CrNiMoCuN 25-6-3	1.4507	0,030	0,70	2,0	0,03 5	0,01 5	0,20/0,3 0	24,0/26, 0	3,0/4,0	6,0/8,0	Cu: 1,00/2,5 0
X2CrNiMoN 25-7-4	1.4410	0,030	1,00	2,0	0,03 5	0,01 5	0,24/0,3 5	24,0/26, 0	3,0/4,5	6,0/8,0	-
X2CrNiMoCu WN 25-7-4	1.4501	0,030	1,00	1,0	0,03 5	0,01 5	0,20/0,3 0	24,0/26, 0	3,0/4,0	6,0/8,0	Cu: 0,50/1,0 0 W: 0,50/1,0 0

3. MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK

Martenzitni nehrđajući čelici spadaju u skupinu čelika kojima je maseni udio kroma između 12 % i 18 %, udio ugljika od 0,15 % do 1,2 % te mogu sadržavati i do 1,3 % molibdena i 2,5 % nikla. Glavni element koji utječe na svojstva ove grupe čelika je ugljik. Što je udio ugljika u njima manji, oni pokazuju veću žilavost i otpornost na pukotine [13].

Kada su početkom 20. stoljeća prvi puta otkrivena antikorozijska svojstva legura željeza i kroma, bilo je vrlo teško ukloniti ugljik iz taline željeza i kroma. Prema tome, prvi nehrđajući čelici, otkriveni gotovo istovremeno u Engleskoj i Njemačkoj bili su zapravo martenzitni čelici [14].

Takvi čelici moraju posjedovati sposobnost strukturnih pretvorbi iz neke početne neaustenitne strukture u austenit te zatim u martenzit, jer se martenzitna mikrostruktura ovih čelika postiže alotropskom transformacijom austenita. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ove skupine čelika postiže se propisanom toplinskom obradom, kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem [13,11].

Martenzitne nehrđajuće čelike moguće je podijeliti u dvije skupine [11]:

1. Konstrukcijski (do $\approx 0,25$ % C, poboljšavaju se) i
2. Alatni čelici ($>0,3$ % C, nakon kaljenja se nisko popuštaju).

Kod konstrukcijskih čelika posebna pažnja pridaje se korozijskoj postojanosti, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev otpornosti na abrazijsko trošenje. Alatni čelici zato imaju dvofaznu mikrostrukturu (martenzit i karbidi) te je njihova korozijska otpornost nešto niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture.

Martenzitni nehrđajući čelici imaju širok raspon vrijednosti za čvrstoću i granicu razvlačenja. Raspon granice razvlačenja je od 275 MPa u žarenom stanju, do 1900 MPa u gašenom i popuštenom stanju. Popuštanje čelika potrebno je provesti kako bi se dobila prihvatljiva žilavost i duktilnost za većinu inženjerskih namjena. Valja napomenuti kako je ipak glavno svojstvo ove skupine čelika visoka tvrdoća što je temelj za dobru otpornost na abrazijsko trošenje.

Martenzitni čelici nisu toliko dobro korozijski postojani kao ostali nehrđajući čelici. Razlog tome je viši sadržaj ugljika i niži sadržaj kroma nego kod drugih čelika. Iz tog razloga ova vrsta čelika

primjenjuje se u aplikacijama gdje je potrebna visoka čvrstoća i tvrdoća materijala, dok korozijska postojanost nije toliko bitna.

Osim slabije korozijske postojanosti, ovi su čelici zbog manjeg udjela kroma i drugih legiranih elemenata jeftiniji od drugih nehrđajućih čelika.

Ova vrsta čelika svoju primjenu nalazi kod izrade lopatica parnih, plinskih i mlaznih turbina na relativno niskim radnim temperaturama, za parne cjevovode, vodne turbine, brane u kanalima sa slatkom vodom, cijevi i ventile u rafinerijama nafte i dr. Martenzitni čelici s niskim sadržajem ugljika koriste se za naftovode i plinovode, dok se oni sa većim udjelom ugljika i kroma koriste za zupčanike, osovine, kirurške instrumente i sl.

U pravilu se martenzitni čelici primjenjuju na temperaturama do 650 °C zbog mogućnosti opadanja mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti na višim temperaturama.

Martenzitni čelici imaju najlošiju zavarljivost od svih nehrđajućih čelika zbog pojave nepopuštenog martenzita za vrijeme hlađenja nakon zavarivanja. Slično kao i kod ostalih konstrukcijskih čelika potrebno je poduzeti posebne mjere opreza pri zavarivanju ovih čelika, posebno onih s više od 0,1 % C.

Prema osjetljivosti na vodikom inducirane pukotine ili hladne pukotine, martenzitni čelici mogu se podijeliti u 3 grupe. Podjela se temelji na udjelu ugljika koji najviše utječe na tvrdoću martenzita u netom zavarenom stanju, o kojem ovisi daljnja osjetljivost na hladne pukotine.

Najmanje problematični čelici spadaju u prvu grupu, sadrže do 0,06 % C i tvrdoća im je do 36 HRC. Zavarivanje ovih čelika slično je kao i kod zavarivanja niskolegiranih visokočvrstih čelika.

U drugu grupu pripadaju čelici sa sadržajem ugljika od 0,06 % C do 0,3 % C, a tvrdoća im je od 36 HRC do 55 HRC. Oni su skloniji pojavi pukotina te se obavezno moraju podvrgnuti predgrijavanju.

U trećoj skupini nalaze se čelici sa više od 0,3 % C i tvrdoćom nakon zavarivanja od 55 do 65 HRC. Oni zahtijevaju posebnu pažnju tijekom i nakon zavarivanja [15].

3.1. Standardne vrste martenzitnih nehrđajućih čelika

U tablici 5 popis je najčešće primjenjivanih nehrđajućih martenzitnih čelika te njihov kemijski sastav prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8].

Tablica 5 Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8]

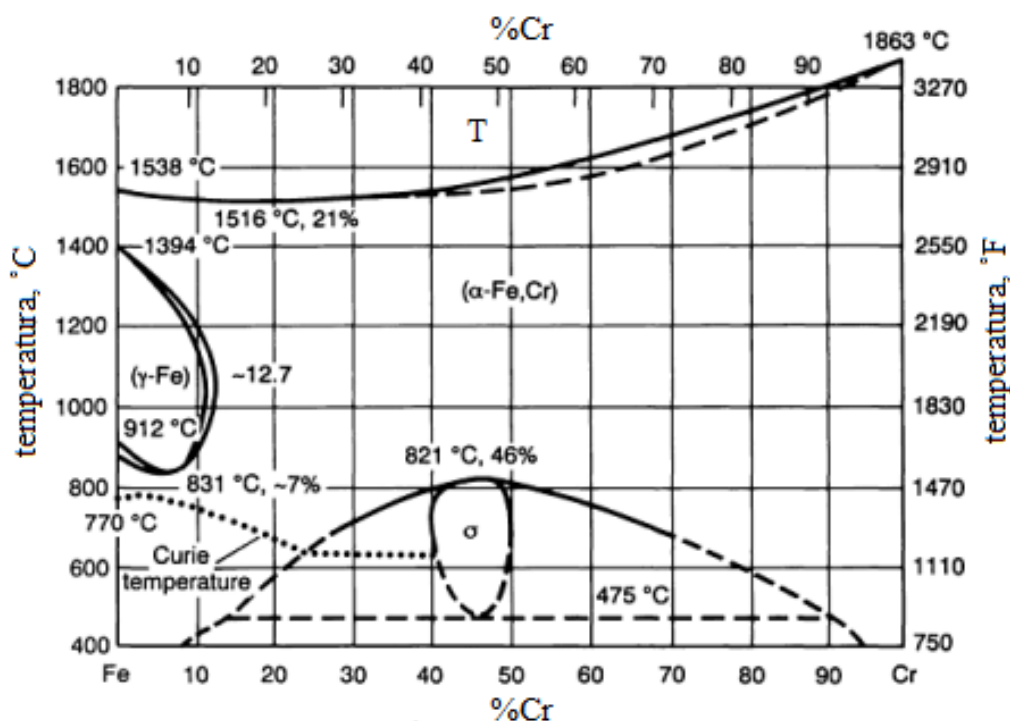
Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X12Cr13	1.4006	0,08/0,15	1	1,5	0,04	0,02	-	11,5/13,5	-	0,75	-
X15Cr13	1.4024	0,12/0,17	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0,16/0,25	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0,26/0,35	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X46Cr13	1.4034	0,43/0,50	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X38CrMo14	1.4419	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	13,0/14,5	0,60/1,00	-	-
X55CrMo14	1.4110	0,48/0,60	1	1	0,04	0,02	-	13,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,15
X50CrMoV15	1.4116	0,45/0,55	1	1	0,04	0,02	-	14,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,1/0,2
X39CrMo17-1	1.4122	0,33/0,45	1	1,5	0,04	0,02	-	15,5/17,5	0,80/1,30	1	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	0,05	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	12,0/14,0	0,30/0,70	3,5/4,5	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	0,06	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	15,0/17,0	0,80/1,50	4,0/6,0	-

Dostupan je velik broj martenzitnih čelika, s udjelom od 11,5 % Cr do 18 % Cr. Većina ovih čelika sadrže od 0,1 % C do 0,25 % C, a nekima su dodani legirni elementi kao što su Mo, V i W kako bi poboljšali stabilnost na povišenim temperaturama formiranjem stabilnih karbida. Dodavanjem nikla poboljšava se žilavost ove skupine čelika.

3.2. Formiranje mikrostrukture

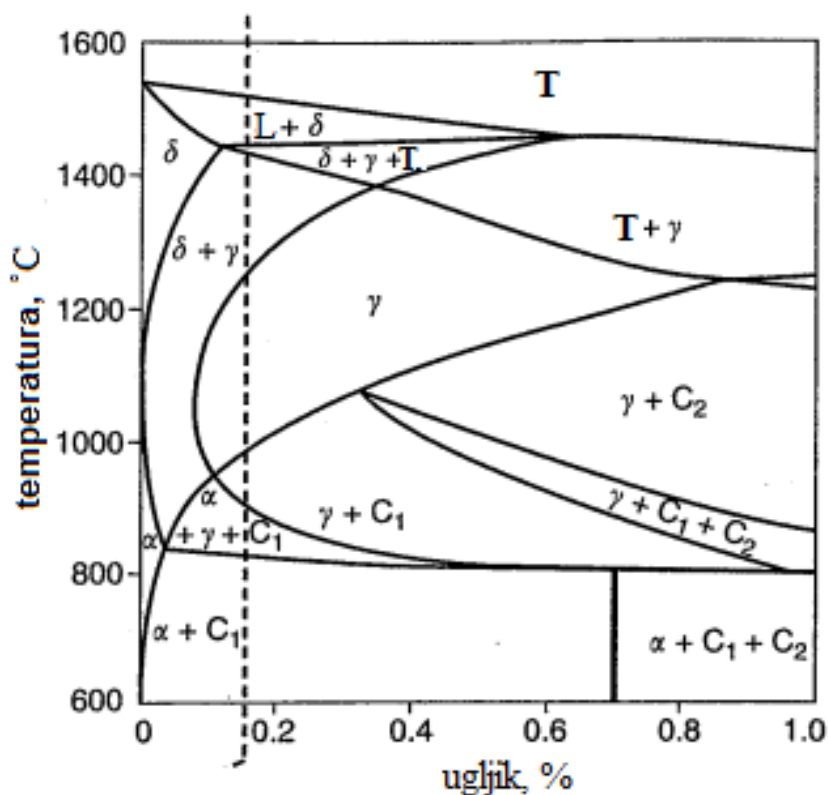
Na slici 5 prikazan je sustav željezo-krom u kojem se može promatrati formiranje mikrostrukture martenzitnih nehrđajućih čelika. Feritna faza s prostorno centriranom kubnom rešetkom (*eng.* Body centered cubic, BCC) prisutna je u širokom rasponu temperatura i udjela. Austenitna faza (*eng.* Face centered cubic, FCC) pojavljuje se u temperaturnom intervalu od 800 °C do 1400 °C kod legura koje sadrže do 12,7 %Cr u području koje se, zbog specifičnog oblika naziva gama petlja. Pri ravnotežnim uvjetima hlađenja austenit iz gama petlje transformira se ponovo u ferit, a pri bržem ohlađivanju (nadkritičnom) u martenzit.

Dodavanjem ugljika i ostalih gamagenih elemenata u sustav Fe-Cr širi se gama petlja, stabilizira austenitna faza i olakšava transformacija austenita u martenzit [14].



Slika 5 Fazni dijagram za sustav Fe – Cr [14]

Na slici 6 prikazan je pseudobinarni dijagram trojnog sustava Fe-Cr-C s 13 %Cr u kojem se može pratiti promjena faza tijekom skrućivanja i hlađenja do sobne temperature.



Slika 6 Pseudobinarni dijagram za trojni sustav Fe-Cr-C s 13 % Cr [14]

Legure s udjelom ugljika između 0,1 %C i 0,25 %C nakon skrućivanja imaju feritnu ili feritno-austenitnu strukturu. Polaganim odvođenjem topline ferit potpuno prelazi u austenit koji se na još nižim temperaturama ponovo transformira u ferit. Osim ferita u strukturi je prisutna i određena količina kromovih karbida (Cr_{23}C_6). Ako je hlađenje brže austenit neće prekrystalizirati u ferit nego u martenzit. Transformacija počinje na temperaturi M_s , a završava na temperaturi M_f . Temperatura M_f je najčešće oko 150 °C do 200 °C ispod temperature M_s .

Temperature M_s i M_f ovise najviše o sastavu čelika. Ugljik i većina drugih legirnih elemenata pomiču ih prema nižim vrijednostima. Kod martenzitnih čelika s udjelom ugljika između 0,1 i 0,25 %C temperatura M_s je u rasponu od 200 °C do 400 °C, pa ne postoji opasnost da se potpuna transformacija austenita u martenzit neće odviti hlađenjem do sobne temperature. Kod martenzitnih čelika s većim udjelom legirnih elemenata, a osobito kod onih koji sadrže 4 %Ni i više, temperatura M_f niža je od sobne temperature. Kod njih se često u mikrostrukturi uz martenzit

nalazi i zaostali austenit. Zaostali austenit je ponekad poželjan u mikrostrukturi martenzitnih čelika jer, u određenim uvjetima, povisuje žilavost.

Austenit ima veću gustoću od martenzita pa se pretvorbom austenita u martenzit povećava ukupni volumen.

U žarenom stanju (prije kaljenja i popuštanja) granica razvlačenja martenzitnih čelika iznosi oko 275 MPa. Mikrostruktura se sastoji od ferita i karbida. U takvom stanju se ovi čelici daju dobro hladno oblikovati deformiranjem ili obradom odvajanjem čestica. Veća čvrstoća dobiva se toplinskom obradom, a kolika će ona biti, najviše ovisi o sadržaju ugljika u čeliku. S porastom masenog udjela ugljika rastu i čvrstoća i tvrdoća, a padaju istezljivost i žilavost. Martenzitni čelici s višim udjelima ugljika dosežu tvrdoće do 60 HRC [14,15].

3.3. Toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika

Toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika u suštini se ne razlikuje od one kod ugljičnih čelika i niskolegiranih čelika te maksimalna tvrdoća i čvrstoća ovise o udjelu ugljika u čeliku.

Pravilnom toplinskom obradom čelika mogu se postići različita mikrostrukturna stanja, a time i različita mehanička svojstva čelika, u širokom rasponu vrijednosti. Tipična toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika sastoji se od žarenja u svrhu poboljšanja rezljivosti i deformabilnosti čelika u hladnom stanju, austenitizacije s ciljem postizanja austenitne ili austenitno-karbidne mikrostrukture, nadkritičnog hlađenja pri kojem austenit prelazi u martenzit te popuštanja kojim se povisuje duktilnost i žilavost martenzitne mikrostrukture.

Osim martenzita, u mikrostrukturi martenzitnih nehrđajućih čelika, nakon toplinske obrade može biti karbida i zaostalog austenita. Volumni udio i veličina karbidnih čestica te količina zaostalog austenita, direktno utječu na tvrdoću, čvrstoću, žilavost, korozijsku i tribološku postojanost čelika [16].

3.3.1. Austenitizacija

Za postizanje željene tvrdoće martenzitnih čelika nužno je zagrijati čelik na temperaturu austenitizacije, tj. na temperaturu na kojoj je mikrostruktura čelika potpuno austenitna ili austenitna s određenim udjelom neotopljenih karbida. Samo iz austenita, uz dovoljno brzo hlađenje, može nastati martenzit.

Temperatura austenitizacije, ϑ_a martenzitnih čelika iznosi od 950 °C do 1100 °C.

Viša temperatura austenitizacije doprinosi jačem otapanju karbida, okrupnjavanju preostalih karbidnih čestica i većoj količini legirnih elemenata otopljenih u austenitnoj metalnoj osnovi. Na višoj temperaturi povećava se opasnost od rasta austenitnih zrna. Maseni udio u austenitu otopljenih legirnih elemenata izravno utječe na temperaturu početka i završetka pretvorbe austenita u martenzit (M_s i M_f), tj. na udio zaostalog austenita (A_z), tvrdoću nakon kaljenja i tvrdoću nakon popuštanja. Volumni udio i veličina neotopljenih karbida utječe na veličinu i rast austenitnog zrna te na otpornost na trošenje.

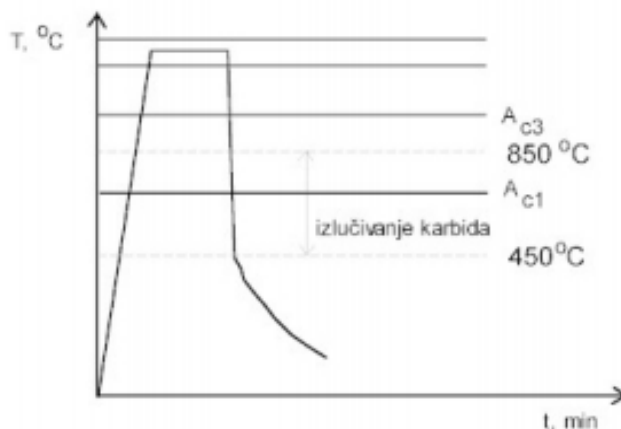
Osim temperature austenitizacije, važnu ulogu u postizanju željene mikrostrukture i traženih svojstava ima i trajanje austenitizacije. U pravilu, duljim zadržavanjem čelika na temperaturi austenitizacije tvrdoća nakon gašenja blago pada.

Proces u kojem se čelik grijanjem dovodi na temperaturu austenitizacije, određeno vrijeme drži na toj temperaturi, a nakon toga gasi, naziva se kaljenjem [11,13].

3.3.2. Gašenje

Nakon držanja na temperaturi austenitizacije, čelici se hlade dovoljno velikom brzinom da se osigura prelazak austenita u martenzit (Slika 7). Zbog visokog udjela legirnih elemenata većina martenzitnih čelika je kaljiva na zraku. Gašenje se uglavnom provodi u ulju ili na zraku kako bi se osigurala potpuna transformacija austenita u martenzit. Veća brzina gašenja može dovesti do deformacija i pukotina, a sporije hlađenje može prouzročiti nastanak precipitata i smanjenje tvrdoće.

Općenito, za martenzitne nehrđajuće čelike vrijedi da je M_s temperatura, temperatura početka transformacije austenita u martenzit, u rasponu od $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. M_f temperatura, temperatura završetka martenzitne pretvorbe je od $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ispod temperature M_s [11,13].



Slika 7 Dijagram gašenja Cr – Ni čelika [16]

Toplinska obrada koja se sastoji od austenizacije i ohlađivanja, odnosno gašenja na zraku naziva se normalizacija. Za kvalitetnu normalizaciju treba čelične dijelove jednolično zagrijati po čitavom obujmu, te ih također jednolično ohladiti na mirnom ili zraku koji se jednolično giba, da bi se čelični dio po cijelom obujmu jednako ohladio.

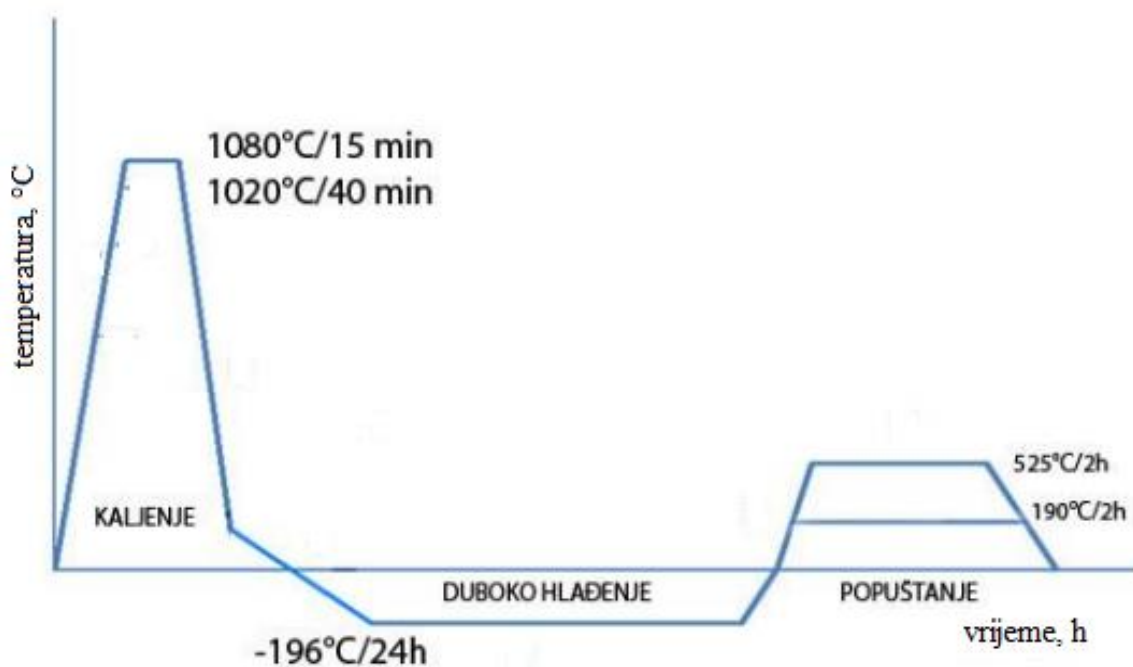
3.3.3. Duboko hlađenje

Duboko hlađenje nužno je kod martenzitnih čelika kojima je temperatura M_f ispod sobne temperature i kod kojih gašenjem do sobne temperature u mikrostrukturi ostaje veći ili manji udio zaostalog austenita. Sredstvo za duboko hlađenje je suhi led ili dušik u tekućem stanju. U početnoj fazi dubokog hlađenja mogu se koristiti i električni hladnjaci do temperatura približno $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kako ne bi došlo do pojave toplinskog šoka, a time i mogućnosti pojave pukotina, brzina hlađenja zaostalog austenita ne smije biti veća od $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Prijelaz zaostalog austenita u martenzit na temperaturama duboko ispod ništice odvija se vrlo sporo. Čelik treba duboko hladiti u periodu od 24 do 36 sati. Tako dugi periodi su potrebni kako bi se dalo vremena za željene transformacije u materijalu, znajući pri tom da je molekularna aktivnost na niskim temperaturama značajno smanjena [11,13].

3.3.4. Visokotemperaturno popuštanje

Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika u kaljenom stanju sastoji se većim dijelom od martenzita. Uz martenzit mogu biti prisutni karbidi, a vrlo često i zaostali austenit ako gašenjem nije dosegnuta temperatura M_f . U takvom stanju čelik je tvrd i krhak, s visokim zaostalim naprezanjima i praktički je neupotrebljiv. Smanjenje krhkosti, povećanje duktilnosti i smanjenje zaostalih naprezanja postiže se toplinskom obradom popuštanjem. Postupak popuštanja sastoji se od zagrijavanja na temperaturu popuštanja, koja se nalazi na temperaturi ispod temperature početka strukturnih promjena, držanja čelika na toj temperaturi i sporog hlađenja do sobne temperature. U pravilu se uvijek radi o visokotemperaturnom popuštanju. Temperatura popuštanja ovisi o vrsti čelika, uvijek je niža od temperature pretvorbe u austenit, a obično je oko 550 °C.

Na slici 8 je prikazan tipičan dijagram toplinske obrade martenzitnih nehrđajućih čelika, s fazama kaljenja, dubokog hlađenja i popuštanja [11,13].

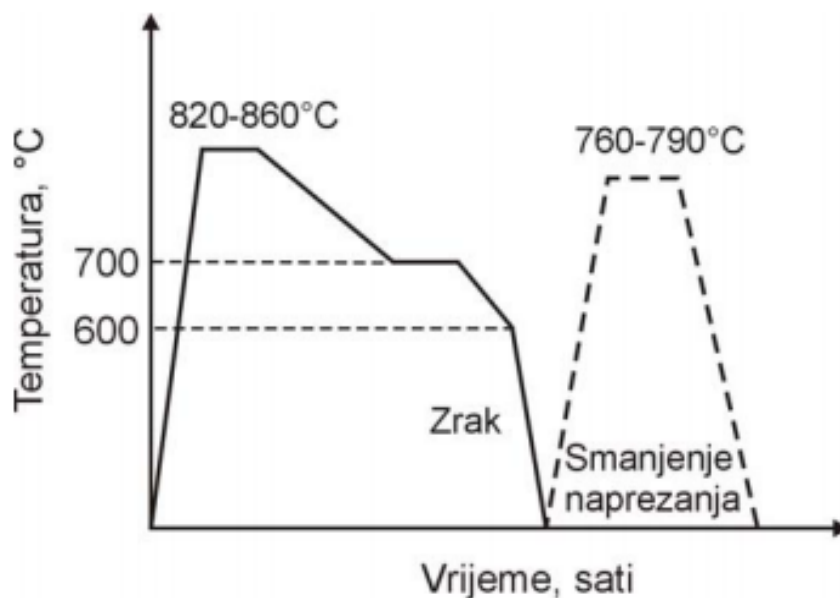


Slika 8 Dijagram toplinske obrade martenzitnih nehrđajućih čelika [18]

3.3.5. Sferoidizacijsko (meko) žarenje

Martenzitni nehrđajući čelici najčešće se isporučuju u sferoidizacijski žarenom stanju. U ovom stanju čelici imaju dobru rezljivost i oblikovljivost u hladnom stanju, i lakše se oblikuju u konačni (ili skoro-konačni) oblik. Naknadnim kaljenjem i popuštanjem postižu se zahtijevana eksploatacijska svojstva.

Sferoidizacijsko ili meko žarenje postupak je ugrijavanja čelika na odgovarajuću temperaturu, duljeg držanja na toj temperaturi i vrlo sporog hlađenja. Fizikalna osnova procesa je djelovanje površinskih napetosti u smislu globularizacije. Karbidi koji se nalaze u feritnoj metalnoj osnovi, zadržavanjem na temperaturi žarenja, poprimaju kuglasti oblik. Time se smanjuje tvrdoća čelika i poboljšavaju svojstva obradljivosti. Temperatura i vrijeme žarenja utječu na maseni udio i veličinu karbidnih čestica. Što je viša temperatura to je niža tvrdoća i bolja oblikovljivost čelika ali se povećava opasnost od rasta zrna što loše utječe na neka mehanička svojstva. Na slici 9 prikazan je dijagram postupka žarenja martenzitnih čelika. Nakon žarenja na 820 °C - 860 °C preporuča se provođenje dodatnog žarenja na 760 °C -790 °C radi smanjenja naprezanja. Dodatno žarenje se može provesti nakon grube obrade odvajanjem čestica tj. prije završne obradbe [11,13].



Slika 9 Dijagram žarenja martenzitnih čelika [11]

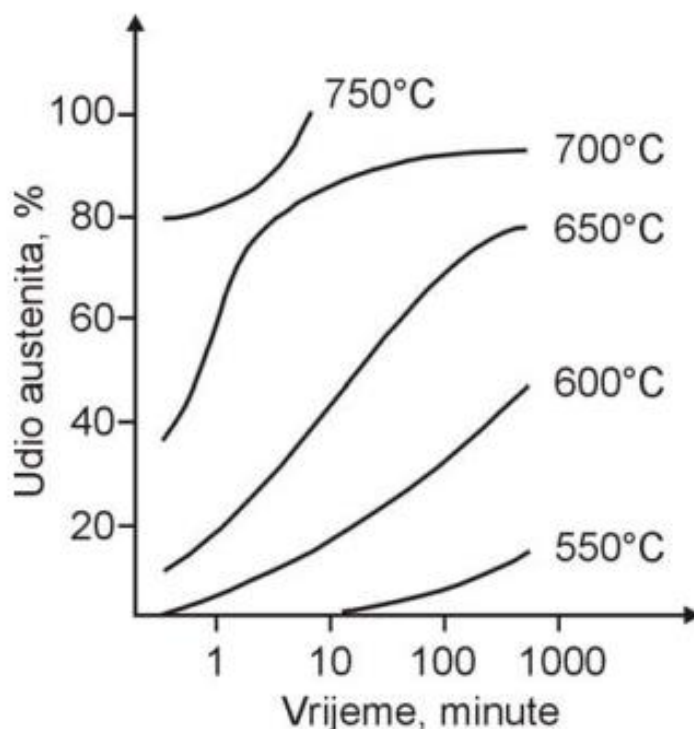
3.4. Mekomartenzitni čelici

Mekomartenzitni čelici razvijeni su krajem 20. stoljeća kako bi se poboljšala eksploatacijska i preradbena svojstva koja standardni martenzitni čelici ne zadovoljavaju. Oni spadaju u skupinu ultračvrstih čelika. Pri svakom namjeravanom razvoju čelika nastoje se ostvariti i druga, možda po važnosti sekundarna poboljšanja, u odnosu na skupinu čelika koja se tim razvojem usavršava. Tako se kod niskougljičnih korozijski postojanih martenzitnih čelika, nazvanih „mekomartenzitni“, željelo različitim zahvatima u njihov sastav utjecati na korozijsku postojanost (opću i posebnu), na povišenje prokaljivosti do najvećih presjeka te otpornosti na popuštanje sa svrhom proširenja primjenljivosti i na radu pri visokim temperaturama.

Osnovna ideja razvoja ovih čelika je smanjenje sadržaja ugljika te uz to zadržavanje martenzitne strukture. Samim sniženjem ugljika snizile bi se i čvrstoća i granica razvlačenja, pa se to treba kompenzirati dodavanjem odgovarajućih legirnih elemenata, 13 % – 18 % Cr, 1 % – 6 % Ni i < 3 % Mo, koji neće negativno utjecati na ostala svojstva kao što je npr. zavarljivost. Legiranje niklom kompenzacija je za niski sadržaj ugljika. Nikal kao gamageni legirni element širi područje austenita u faznom dijagramu čime se omogućava fazna transformacija u martenzit. Molibden se dodaje radi poboljšanja korozijske postojanosti, a titan zbog stabilizacije mikrostrukture formiranjem titanovih karbida (TiC) te povoljnog utjecaja na veličinu kristalnih zrna

Ova podskupina čelika, mekomartenzitni čelici, s realno 0,03 % do 0,05 % C postiže svoja fizikalna, mehanička i kemijska svojstva austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri 450 °C do 700 °C, odabirom takve temperature da se ostvari ili maksimalna tvrdoća (čvrstoća) ili maksimalna žilavost.

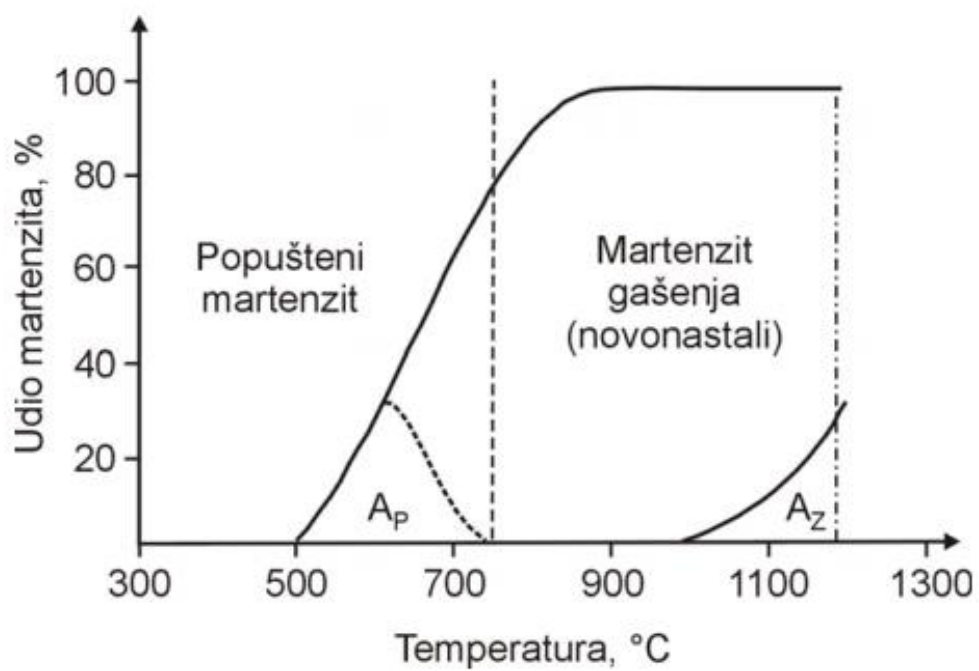
Nastanak mikrostrukture mekomartenzitnog čelika najjednostavnije se može promatrati pomoću TTA dijagrama (Time-Temperature-Austenitizing) prikazanog na slici 10 iz dijagrama se može zaključiti kako je maksimalna dopuštena radna temperatura oko 500 °C, jer se već pri 550 °C nakon 800 sati stvara u čeliku postupno do 15 % austenita. Pri 700 °C taj bi udio austenita već nakon sat i pol bio gotovo 90 % [19].



Slika 10 TTA dijagram [11]

Na slici 11 prikazane su promjene struktura pri gašenju i pri popuštanju. Do 100% martenzitne strukture dolazi se gašenjem s temperature austenitizacije od 900 °C – 1000 °C. Kada bi temperatura gašenja bila iznad 1000 °C, došlo bi do pojave zaostalog austenita (A_z), koji bi se zajedno s novonastalim martenzitom raspao pri popuštanju na temperaturi oko 450 °C. Iz tog se razloga austenitizacija ne provodi na temperaturama iznad 1050 °C.

Zagrijavanjem martenzita nastalog gašenjem do ~500 °C dolazi do popuštanja martenzita ali njegov udio ostaje 100%. Zagrijavanjem na 500 °C - 700 °C dolazi do pojave austenita popuštanja (A_p) koji je vrlo inertan na pretvorbu i ostaje fino dispergirani u popuštenom martenzitu i osigurava visoku žilavost i dobru zavarljivost. Iz tog razloga preporuča se da se popuštanje mekomartenzitnih čelika provodi na temperaturi do oko 620 °C [19].



Slika 11 Strukture popuštanja čelika s 14 %Cr, 5 %Ni i 1,5 %Mo [11]

U tablici 6 prikazane su temperature gašenja i popuštanja nekih mekomartenzitnih čelika te vrijednost granice razvlačenja $R_{p0.2}$.

Tablica 6 Temperature gašenja i popuštanja nekih mekomartenzitnih čelika [19]

Oznaka čelika	Sastav, ostalo, [%]	Gašenje		Popuštanje		$R_{p0.2}$, [N/mm ²]
		ϑ_a , [°C]	Sredstvo	ϑ_p , [°C]	t_p , [h]	
X5 CrNi 13 14	$\leq 0,7$ Mo	900-1000	zrak	450	2	900
				530	8	850
				600	8	600
X3 CrNi 13 4	$\leq 1,0$ Mo	950-1050	zrak	680	2	750
X5 CrNi 13 6	-	950-1050	zrak	530	8	850
				600	8	600
X5 CrNi 17 4	-	do 1000	zrak	580		540
X4 CrNiMo 13 4	0,5 Mo	950-1050	zrak	550		850
				620		600
X3 CrNiMo 14 5	2,3 Mo	950-1050	zrak	450	2	990
				500	2	1000
				600	2	800
(G)-X5CrNiMo 16 5	1,5 Mo	1000	zrak	520		800
				600		530
				450	2	980
X4 CrNiMo 16 5	1,0 Mo	1000	zrak	500	2	1020
				620	2	580
				680	2	670

ϑ_a – temperatura austenitizacije;

ϑ_p – temperatura popuštanja;

t_p – trajanje popuštanja.

Procjenjuje se kako su mekomartenzitni čelici primjenjivi u temperaturnom rasponu od -100 °C do 300 °C. Pri duljem radu na temperaturama većim od 550 °C došlo bi do pojave austenita što se ne smije dopustiti zbog snižavanja svojstava čelika

Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica turbina, za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi (rotori, osovine, lopatice, klizne plohe) itd. [20].

4. ZAVARIVANJE MARTENZITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Prilikom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika posebnu pažnju potrebno je posvetiti odabiru postupka zavarivanja, zaštitnim plinovima te čišćenju površine kako bi smanjili unos vodika. Korištenje predgrijavanja i naknadne toplinske obrade općenito se preporučuje jer se smanjuju količina vodika u metalu zavara i zaostala naprezanja. Zbog formiranja nepopuštenog martenzita tijekom hlađenja nakon zavarivanja, martenzitne legure smatraju se najslabije zavarljivim od svih vrsta nehrđajućih čelika.

Od elektrolučnih postupaka zavarivanja primjenjuje se REL s elektrodama standardne izvedbe. REL postupak zavarivanja detaljnije je pojašnjen u poglavlju 4.5.

TIG se koristi uz istosmjernu struju i minus pol na elektrodi. Postupak je vrlo pogodan za zavarivanje cijevi malih promjera, te za zavarivanje ploča. Zavarivanje bez dodatnog materijala se ne preporučuje zbog mogućih grešaka poroznosti i pukotina. TIG postupak zavarivanja detaljnije je pojašnjen u poglavlju 4.6.

Preporuča se i MIG postupak zavarivanja. Kod MIG postupka zavarivanja koristi se žica na “+” polu. Kao zaštitni plin koristi se argon ili helij. Mali dodaci kisika ili CO₂ dodaju se argonu ili smjesi argon - helij da povećaju stabilnost luka i da doprinesu boljoj kvaliteti zavara. Prijenos kapi u luku može biti u kratkim spojevima ili štrcajućim lukom [9].

EPP se također koristi za zavarivanje martenzitnih čelika. Visok postotak miješanja (30 % - 50 %) i izgaranja Cr i ostalih legiranih elemenata može se nadoknaditi dodatkom istih u prašak. Upotrebljava se istosmjerna i izmjenična struja.

Osim navedenih elektrolučnih postupaka zavarivanja, ova vrsta čelika može se zavarivati elektronskim snopom, laserom, elektrotopnim zavarivanjem te zavarivanjem trenjem [14].

4.1. Mikrostruktura zavara

Kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika, zona taljenja i dio ZUT-a koji je zagrijan na temperaturu višu od temperature austenitizacije za zadani čelik, tijekom hlađenja do sobne

temperature poprimaju krhku martenzitu mikrostrukturu. S obzirom da je takva mikrostruktura znatno lošije duktilnosti i lomne žilavosti od okolne mikrostrukture, toplinskim obradama poboljšane, ovakav čelik se ne može koristiti odmah nakon zavarivanja, već se mora provesti toplinska obrada kako bi se postigla povoljnija mehanička svojstva.

Na svojstva metala zavara nakon zavarivanja te na utjecaj toplinske obrade nakon zavarivanja utječe se pravilnim odabirom dodatnog materijala. Svojstva zone utjecaja topline mogu se kontrolirati pravilnim odabirom postupka zavarivanja, parametara postupka zavarivanja i naknadnom toplinskom obradom [14].

Na slici 12 prikazana su 4 različita područja zone utjecaja topline te su napisane faze svake od njih.



Slika 12 4 područja ZUT-a [14]

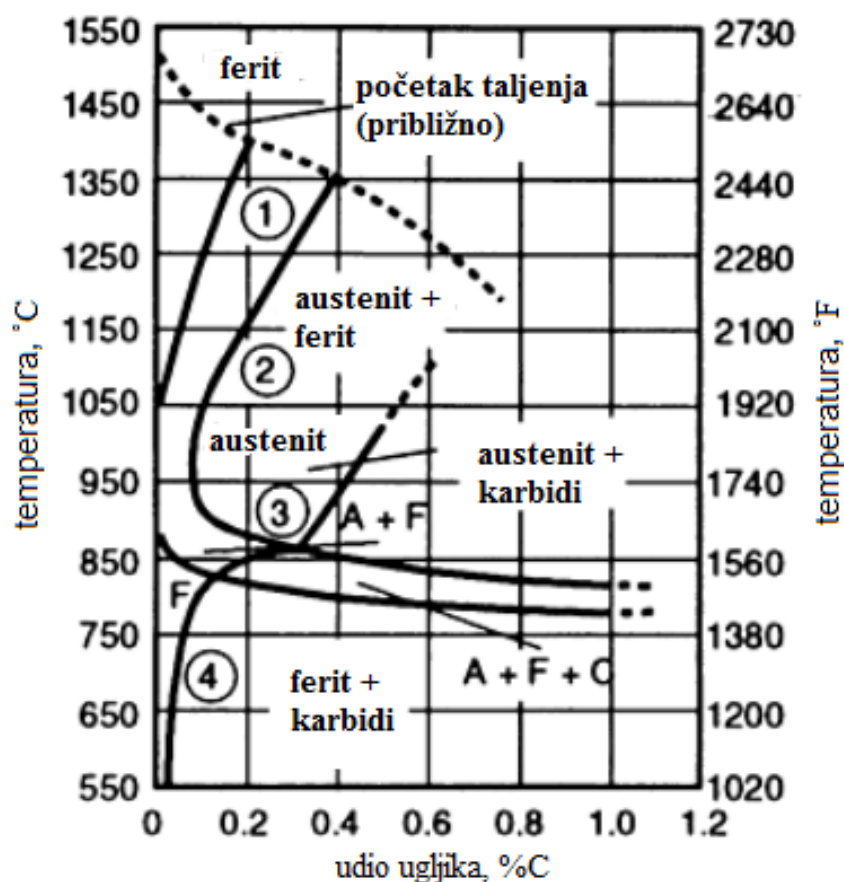
Područje 1 – Nalazi se uz zonu staljivanja, sastoji se od dviju faza, martenzita i ferita. Do pojave ferita uz liniju staljivanja dolazi jer se to područje zavarivanjem zagrijalo na temperaturu austenitnog i feritnog faznog područja.

Područje 2 – Kako je ovaj dio ZUT-a zagrijan do visokotemperaturne austenitne faze, karbidi iz legure osnovnog materijala se potpuno otapaju te iz grubozrnatog austenita nastaje martenzit.

Područje 3 – Sastoji se od nepopuštenog martenzita i mjestimično od neotopljenih karbida. Karbidi se nisu potpuno otopili jer je to područje ZUT-a zagrijano na nešto niže temperature austenitne faze.

Područje 4 – Gotovo identična mikrostruktura kao i kod osnovnog materijala. Sastoji se od popuštenog martenzita i karbida [14].

Ova područja također su označena u pseudobinarnom Fe-Cr-C dijagramu prikazanom na slici 13.



Slika 13 Fe-Cr-C pseudobinarni fazni dijagram za martenzitni čelik s 12% Cr [14]

4.2. Dodatni materijali

Dva su osnovna tipa dodatnih materijala koji se koriste kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika.

1. Dodatni materijal približno jednakog sastava kao osnovni materijal, kako bi dobili martenzitnu strukturu nakon zavarivanja,
2. Austenitni (AISI 300) tipovi ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja (kao rezultat spajanja s osnovnog materijala), odabranog da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istezljivost zavara.

Primjenom austenitnog dodatnog materijala smanjuje se količina difuzijskog vodika, a time je vjerojatnost pojave hladnih pukotina također smanjena. Zona taljenja se ne zakaljuje i zadržava visoku žilavost. Elektrode ovog tipa se upotrebljavaju kada se ne vrši naknadna toplinska obrada. Unatoč svemu ZUT će se ipak zakaliti na zraku. Ali to može biti riješeno samopopuštanjem martenzitne strukture boravkom na visokoj radnoj temperaturi u eksploataciji.

Ako ipak koristimo dodatni materijal istog kemijskog sastava kao što je kod osnovnog materijala, zona taljenja se može naknadno toplinski obrađivati. Također zona taljenja ima isti koeficijent toplinske istezljivosti kao osnovni materijal, što je u nekim slučajevima povoljnije (npr. kod navarivanja radnih površina izloženih naglim temperaturnim promjenama), jer neće uzrokovati toplinska naprezanja pri zagrijavanju i hlađenju [9].

4.3. Toplinske obrade kod zavarivanja

4.3.1. Predgrijavanje, međuprolazna temperatura i dogrijavanje

Općenito je cilj predgrijavanja kod zavarivanja snižavanje temperaturnih razlika između zagrijanog i nezagrijanog mjesta u području zavarivanja. Povišenjem temperature materijala smanjuje se brzina odvođenja topline te time i mogućnost otvrdnuća u ZUT-u kod pojedinih vrsta čelika.

S obzirom da su martenzitni nehrđajući čelici jako prokaljivi kod njih to nije slučaj te će ZUT i zona taljenja koje su bile austenitne i pri sporom hlađenju preći u martenzit. Dakle, predgrijavanje se kod ove skupine čelika ne provodi kako bi se izbjegla martenzitna struktura nakon završenog zavarivanja, već kako bi se smanjio nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja pri stezanju. Predgrijavanjem se smanjuje razlika temperature zavara i osnovnog materijala, a u izvjesnoj mjeri i granice razvlačenja, pa će i zaostale napetosti biti manje. Pri povećanoj temperaturi se povisuje istezljivost i žilavost, što djeluje povoljno. Također, viša temperatura predgrijavanja omogućava izlazak difuzijskog vodika iz zavara. Sve navedene pojave uzrokovane predgrijavanjem smanjuju vjerojatnost pojave hladnih pukotina.

Kod martenzitnih nehrđajućih čelika temperatura predgrijavanja treba biti na temperaturama iznad M_s linije kako bi se spriječila mogućnost nastajanja martenzita tijekom zavarivanja, a temperatura između prolaza ne bi trebala biti viša od 420 °C. U slučajevima zavarivanja tanjih limova, manjih komada ili pri zavarivanju postupcima zavarivanja kojima se unosi velika količina topline (npr. TIG) nije potrebno predgrijavati iznad M_s linije zbog unosa topline u toku zavarivanja, koji automatski povećava temperaturu ZUT-a i ZT iznad M_s .

Praktične smjernice za predgrijavanje kod zavarivanja [21]:

- Predgrijavanje se provodi u zoni uz pripremljeni spoj. Širina zone predgrijavanja iznosi oko 10 debljina materijala, sa svake strane spoja, ne više od 250 mm.
- Mjerenje temperature predgrijavanja je obavezno. Najčešće se to radi pomoću termometra ili termokrede, a kontrola se vrši i sa suprotne strane mjesta zagrijavanja.
- Predgrijavanje ne smije biti prebrzo, jer može uzrokovati deformacije i lomove pripojnih dijelova, ali i presporo je loše zbog loše ekonomičnosti.
- Predgrijavanje se mora izvoditi i kod izrade pripoja i privarivanja raznih pomagala. Predgrijava se lokalno na mjestu pripoja.
- Za vrijeme zavarivanja kontrolira se međuslojna temperatura koja ne smije odstupati od zahtijevane za više od ± 20 °C.
- Predgrijavanje se može izvesti plinskim plamenom, elektrootporno ili indukcijski. Ako se izvodi plinski preporučuju se plinovi propan-butan, zemni plin uz stlačeni zrak ili samo plin. Ne preporuča se predgrijavanje acetilenom i kisikom.

- U situacijama kad se ne predviđa predgrijavanje preporuča se lagano zagrijavanje radnog komada plamenikom, radi uklanjanja kondenzirane vlage s površine.

Dogrijavanje ima za cilj omogućiti izlazak difuzijskog vodika te kod debljih i upetijih zavarenih spojeva smanjiti temperaturna naprezanja u odnosu na slučaj potpunog ohlađivanja. Vrijeme dogrijavanja treba birati ovisno o TTT dijagramu i predvidjeti da je u tom slučaju temperatura predgrijavanja, između prolaza i dogrijavanja, nešto iznad M_s , a ukupno vrijeme od hlađenja prvog prolaza do završetka zavarivanja i dogrijavanja mora završiti prije početka pretvorbe austenita u martenzit. U tom trenutku treba omogućiti hlađenje do ispod M_f (npr. za 20 °C ispod M_f u vremenu od 2 h) da bi se sav zaostali austenit pretvorio u martenzit, a zatim zagrijati lokalno zavar ili čitav radni komad na temperaturu popuštanja martenzita i popuštanja zaostalih napetosti, ali ispod temperature početka strukturnih promjena, A_{c1} .

Ako je predmet tanji i manje upet, tada se može nakon dogrijavanja hladiti na sobnu temperaturu ili što je za jednostavnije slučajeve također moguće hladiti od austenitizacije do sobne temperature bez dogrijavanja. Direktno hlađenje na sobnu temperaturu je najekonomičnije, ali uz rizik pojave hladnih pukotina.

Postoji još mogućnost, da se temperatura za bilo koji slučaj snizi na nešto ispod M_f , drži na toj temperaturi npr. 10 sati, a zatim se hladi do sobne temperature. Svako hlađenje do ispod M_f ili do sobne temperature omogućava pretvorbu u martenzit, pa je poslije neophodno popuštanje martenzita. Podizanje temperature predgrijavanja iz austenitnog područja odmah na temperaturu popuštanja rezultiralo bi nepovoljnom grubozrnatom strukturom (ferit + karbid) [9,14,15] .

4.3.1.1. Savjeti i smjernice za predgrijavanje martenzitnih čelika

Martenzitni nehrđajući čelici koji u sastavu imaju manje od 0,06 %C i tanji su od 12 mm, ne zahtijevaju posebno predgrijavanje ili kontrolu međuprolazne temperature. Za radne komade deblje od 12 mm preporuča se predgrijavanje i održavanje na temperaturi od 120 °C.

Legure koje u sastavu imaju od 0,06 %C do 0,3 %C obavezno se predgrijavaju. Kod tanjih radnih komada, temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura održava se ispod temperature M_s . Deblji radni komadi prethodno navedenog udjela ugljika predgrijavaju se na temperaturu iznad M_s , kako bi se smanjila mogućnost pojave pukotina.

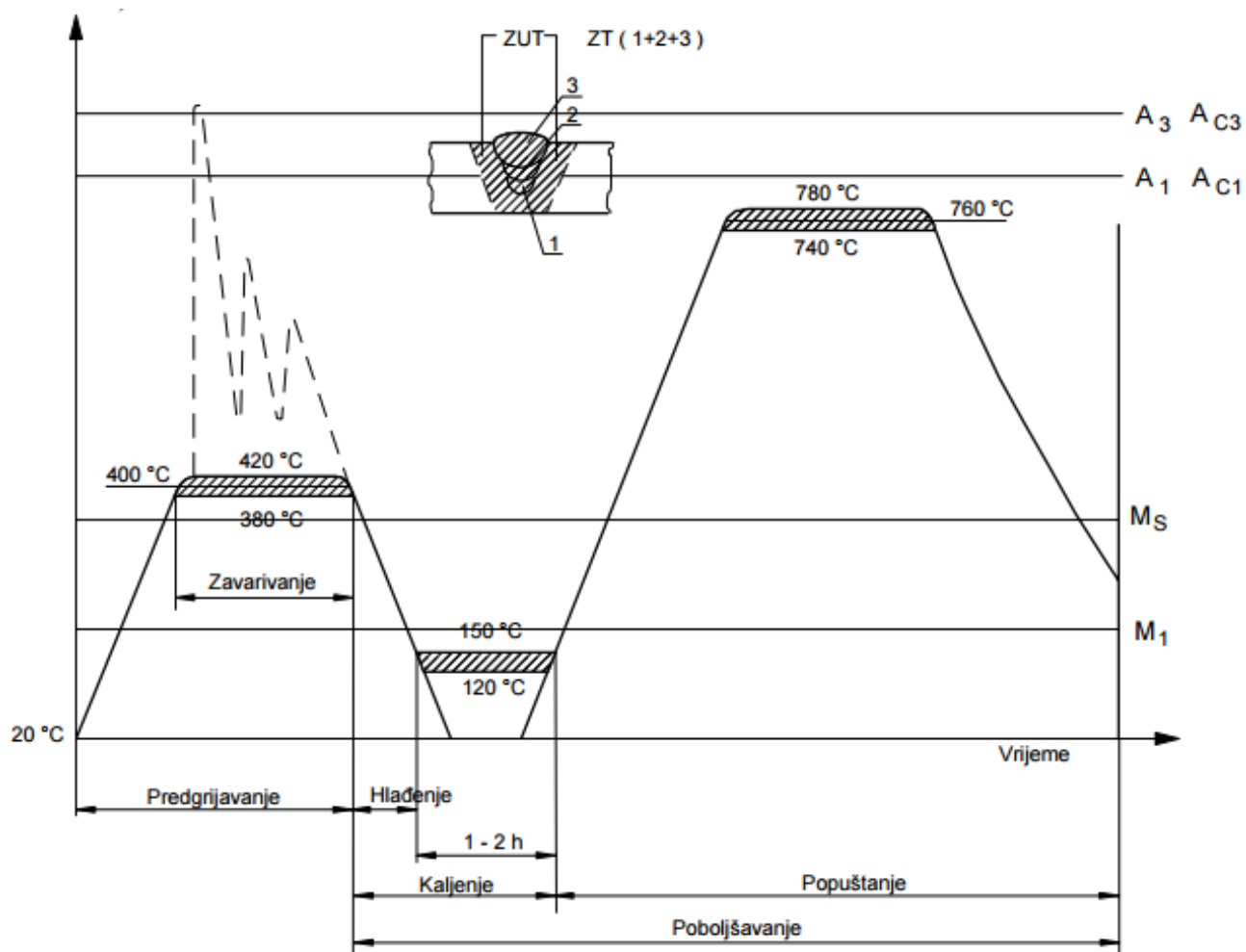
Za martenzitne nehrđajuće čelike s udjelom ugljika većim od 0,3 %C temperatura predgrijavanja je također iznad M_s [15].

4.3.2. Naknadna toplinska obrada

Nakon zavarivanja potrebno je dopustiti ohlađivanje sa temperature predgrijavanja kako se ne bi izostavio pozitivan efekt pretvorbe zaostalog austenita u martenzit. Posljedica direktnog popuštanja bio bi nastanak nepovoljnog grubog ferita i izlučenih karbida. Zbog toga se prije konačnog popuštanja vrši ohlađivanje sa temperature predgrijavanja, odnosno zavarivanja do sobne temperature za tanje dijelove koji se zavaruju ili do temperature nešto ispod M_f za deblje materijale te zadržavanja na toj temperaturi dok ne završi pretvorba zaostalog austenita u martenzit. Tek se nakon toga vrši toplinska obrada popuštanja.

Osnovni materijal i ZUT su nakon pretvorbe u martenzit veoma krhki i tvrdi (500 HV – 600 HV) i potrebna je posebna pažnja pri rukovanju, prenošenju i stavljanju u peć za popuštanje. Naknadnom toplinskom obradom, popuštanjem, dobiva se sitnozrnata struktura raspadnutog martenzita koja osigurava dobru žilavost i istežljivost spoja.

Na slici 14 prikazane su pravilni toplinski procesi pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika. Temperatura predgrijavanja nalazi se iznad M_s temperature ($M_s + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nakon zavarivanja vrši se lagano hlađenje na temperaturu ispod M_f ($M_f - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), te se radni komad zadržava na toj temperaturi 1 h - 2 h da bi se sav zaostali austenit transformirao u martenzit, a zatim se izvodi popuštanje ispod temperature početka strukturnih promjena (ispod A_{c1}) [9, 22].



Slika 14 Dijagram toplinskih operacija tijekom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [14]

4.4. Pukotine

4.4.1. Kristalizacijske i likvacijske pukotine

Većina martenzitnih nehrđajućih čelika skrućuje se poput feritnih, a time je i njihova osjetljivost na kristalizacijske pukotine niska. Međutim, poznato je da određeni čimbenici povećavaju vjerojatnost nastanka kristalizacijskih pukotina. Ti čimbenici uključuju prisutnost niobija i vrlo male količine mangana u leguri. Martenzitni čelici s visokim sadržajem ugljika mogu skrućivati

kao austenitni, što ih također čini osjetljivim na kristalizacijske pukotine. Likvacijske pukotine su rijetke kod martenzitnih nehrđajućih čelika [7].

4.4.2. Pukotine uzrokovane ponovnim zagrijavanjem

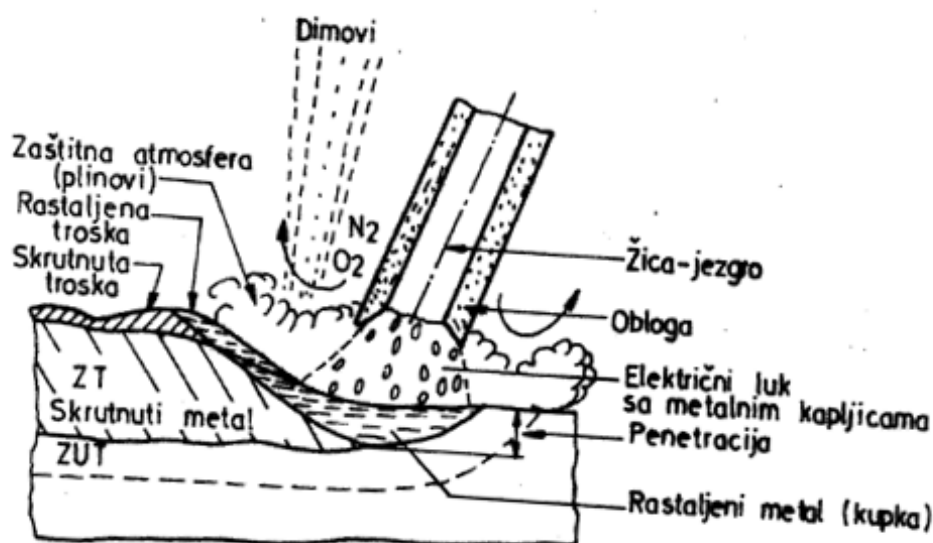
Do ovih pukotina dolazi tijekom ciklusa ponovnog zagrijavanja naknadnom toplinskom obradom zavara ili kod višeslojnog zavarivanja kada se ponovno zagrijava prethodni sloj. Prisutnost molibdena je jedan od čimbenika povezanih s ovim tipom pukotina kod martenzitnih nehrđajućih čelika. Nečistoće poput sumpora, fosfora, antimona, kositra, bora i bakra također su povezani s ovim tipom pukotina. Smanjenjem nečistoća kod čelika, povećanjem unosa topline i eliminacijom koncentracija naprezanja moguće je izbjeći pukotine uzrokovane ponovnim zagrijavanjem. Općenito martenzitni nehrđajući čelici nisu osjetljivi na ponovno zagrijavanje ili naknadnu toplinsku obradu [7].

4.4.3. Vodikove pukotine

Pukotine uzrokovane vodikom funkcija su sadržaja vodika, mikrostrukture i zaostalih naprezanja. Ako se jedan od ovih uzroka može kontrolirati, onda se vodikove pukotine mogu izbjeći. Zavarivanje postupcima s niskim unosom vodika, predgrijavanje i kontrola međuprolazne temperature može smanjiti sadržaj vodika. Kombinacija predgrijavanja i kontrolirani unos topline smanjuje brzinu hlađenja i omogućava popuštanje martenzita. Veoma sporo hlađenje od međuprolazne temperature do ispod M_f (završetak pretvorbe martenzita) ima utjecaj na smanjenje sadržaja vodika. Na primjer, kada se kontinuirani valjak navaruje martenzitnim nehrđajućim čelikom, valjak se nakon navarivanja oblaže izolacijskim materijalom sa svih strana da se održi hlađenje do 100 °C otprilike 16 do 24 sati [7].

4.5. REL postupak zavarivanja

Ručni elektrolučni (REL) postupak zavarivanja obloženom elektrodom spada u postupke zavarivanja taljenjem. Toplinska energija dobivena od električnog luka tali dodatni materijal u obliku obložene elektrode i osnovni materijal. Na slici 15 dan je shematski prikaz REL zavarivanja [23].



Slika 15 Shematski prikaz REL zavarivanja[24]

Kod REL postupka zavarivanja električni luk uspostavlja se kratkim spojem između elektrode koja je ujedno i dodatni materijal i radnog komada. Električna energija za ovaj postupak dobiva se iz izvora koji može biti transformator, ispravljač (diodni, tiristorski ili invertorski) ili pretvarač.

Taljenjem dodatnog materijala dolazi do stvaranja odgovarajuće količine rastaljenog materijala, troske i plinova. Tekuća troska prekriva metalnu kap za vrijeme prolaza kapi kroz električni luk, a dodatnu zaštitu metalne kapi tvore plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge. Taljenje obloge odvija se s unutarnje strane prema vanjskoj, tako da na vrhu elektrode nastaje krater koji usmjerava struju plinova i kapi rastaljenog metala i troske prema rastaljenom osnovnom materijalu.

Hlađenjem tekućeg metala dolazi do njegovog skrućivanja, a sloj troske koji ga prekriva regulira njegovu brzinu ohlađivanja, a samim time utječe na tijek i uvjete kristalizacije. Ravnomjernim dodavanjem elektrode u električni luk te njenim poprečnim gibanjem na mjestu zavarivanja nastaje zavareni spoj [23].

4.5.1. Prednosti i nedostaci REL zavarivanja [23]

Prednosti korištenja ovog postupka zavarivanja su:

- velik izbor dodatnih materijala,
- cijena opreme za zavarivanje niža nego kod MIG/MAG i EPP postupka,
- pogodno za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja,
- pogodno za rad na terenu,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- jednostavno rukovanje opremom i
- dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva.

Nedostaci pri korištenju REL postupka zavarivanja su:

- Mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MIG/MAG i EPP,
- kvaliteta zavarenog spoja značajno ovisi o vještini zavarivača,
- relativno dugo vrijeme izobrazbe zavarivača,
- neizbježan otpada elektrode (8 % - 10 %),
- gubitak materijala zbog prskanja,
- potrebno čišćenje troske i
- nastajanje štetnih plinova uslijed zavarivanja.

4.5.2. Parametri REL zavarivanja

Osnovni parametri kod REL zavarivanja su:

- Jakost, polaritet i vrsta struje,
- brzina zavarivanja i

- nagib elektrode i dužina električnog luka.

Jakost struje ovisi o vrsti i debljini elektrode, obliku spoja, debljini osnovnog materijala i položaju zavarivanja. Kod REL postupka zavarivanja jakost struje najčešće se određuje prema formuli $30 A \text{ do } 40 A \times d$, gdje d predstavlja promjer elektrode u mm. Kod prisilnih položaja zavarivanja uzima se vrijednost obično 10 % - 20 % manja od izračunate. Pri zavarivanju visokolegiranih čelika također potrebna je manja jakost struje zbog visokog omskog otpora tih čelika. Iz tog razloga se elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika lakše pregrijevaju nego elektrode za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika.

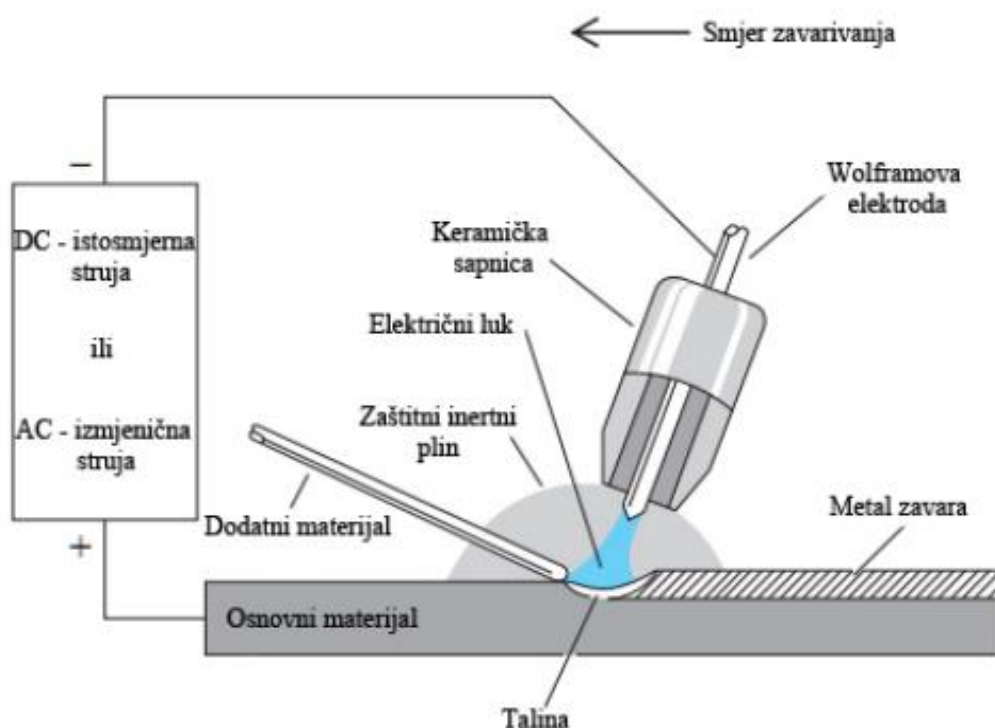
Vrsta struje ovisi o tipu obloge elektrode. Bazične elektrode se najčešće upotrebljavaju sa istosmjernom strujom i “ + “ polom na elektrodi, dok ostali tipovi elektroda (rutilna, kisela, celulozna itd.) mogu biti spojeni na izmjeničnu ili istosmjernu struju.

Dužina električnog luka predstavlja udaljenost elektrode od osnovnog materijala, a ovisi o vrsti elektrode. Kod rutilnih i kiselih elektroda dužina el. luka približno je jednaka promjeru elektrode, dok je kod bazičnih elektroda te elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika i obojenih metala dužina cca. pola promjera elektrode.

Brzina zavarivanja ovisi o tehnici rada, vrsti osnovnog materijala, pripremi spoja i vrsti elektrode. Veća ili manja brzina zavarivanja bitno utječe na kvalitetu spoja. Pri zavarivanju rutilnim i mineralno kiselim elektrodama brzine zavarivanja su veće nego pri zavarivanju bazičnim elektrodama. Kod sitnozrnatih, niskolegiranih i visokolegiranih (CrNi) potrebne su veće brzine zavarivanja radi manjeg unosa topline [23].

4.6. TIG postupak zavarivanja

TIG postupak zavarivanja spada u skupinu elektrolučnih postupaka zavarivanja gdje se toplinom oslobođenom električnim lukom, uspostavljenim između netaljive elektrode (volframove) i radnog komada u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova, tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal [25]. Na slici 16 dan je shematski prikaz TIG zavarivanja.



Slika 16 Shematski prikaz TIG zavarivanja [26]

TIG postupak zavarivanja odlikuje mali depozit, svega 0,4 kg/h – 0,7 kg/h. Tako mali depozit ima za posljedicu vrlo dobru kvalitetu zavarenog spoja.

TIG postupak može se podijeliti na zavarivanje s dodatnim materijalom i to na ručno i automatizirano te na zavarivanje bez dodatnog materijala. Dodatni materijal je obično u obliku šipke, za ručne ili u obliku namotane žice, za automatizirane postupke. Ovim postupkom mogu se

zavarivati razni materijali, nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, aluminij i njegove legure, magnezij, titan, praktično je moguće zavarivanje svih metala[27].

Budući da su zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka zavarivanja, argon i helij skupi, TIG postupak se primjenjuje najviše u zavarivanju navedenih metala koji se teže zavaruju ostalim postupcima. Ovaj postupak zavarivanja se također često primjenjuje u zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih čelika npr. kod izvođenja korijena zavara na cijevima i sličnim spojevima.

4.6.1. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja [27]

Osnovne prednosti ovog postupka zavarivanja su:

- koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT,
- nema prskanja, nema troske,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala,
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja pozicija male debljine,
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova,
- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije, zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom i
- odličan izgled zavarenog spoja.

Osnovni nedostaci TIG postupka zavarivanja su:

- mala brzina zavarivanja,
- mali depozit dodatnog materijala,
- neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija (iznad 6mm),
- zahtijeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duža izobrazba zavarivača,
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima,

- pojačana svjetlost i UV zračenje i
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima.

4.6.2. Parametri TIG zavarivanja

Osnovni parametri TIG zavarivanja su:

- Vrsta i promjer netaljive elektrode,
- vrsta i promjer dodatnog materijala,
- brzina zavarivanja,
- jakost i vrsta struje,
- polaritet elektrode i
- protok i sastav zaštitnog plina.

Jakost struje za zavarivanje i priprema spoja za zavarivanje ovise o vrsti i debljini osnovnog materijala. Područje jakosti struje zavarivanja je od 40 A do 400 A. Npr. za sučeljeni spoj u vodoravnom položaju za aluminij je oko 45 A po milimetru debljine lima.

Vrsta struje i polaritet elektrode određuju raspodjelu topline u električnom luku (raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada) te u skladu s tim moguće je razlikovati 3 slučaja [27]:

1. *Istosmjerna struja – elektroda na "-" polu (DCEN - Direct Current Electrode Negative):*
Elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk, a pozitivni ioni imaju suprotan smjer. Pri tome, količina kinetičke energije elektrona značajno je veća od one iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manje vrha elektrode (približni odnos toplinskog opterećenja: 1/3 na elektrodi, 2/3 na radnom komadu). Zbog toga ovaj način TIG zavarivanja omogućuje rad s manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama, a vrh elektrode može biti zašiljen što daje stabilnost električnom luku. Ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju. Ovo je najčešća kombinacija struje i polariteta kod TIG postupka.
2. *Istosmjerna struja – elektroda na "+" polu (DCEP - Direct Current Electrode Positive):*
Smjer elektrona suprotan je nego kod DCEN slučaja pa je time i raspodjela topline drugačija, elektroda je značajno toplinski opterećena. Ova kombinacija struje i polariteta

primjenjuje se samo kod manjih struja zavarivanja, uz primjenu netaljivih elektroda većeg promjera. Ipak, smjer pozitivnih iona (s elektrode na radni komad) rezultira razaranjem tankih površinskih oksida s površine osnovnog materijala što omogućuje zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura.

3. *Izmjenična struja (AC – Alternate current)*: Smjer toka elektrona mijenja se u jedinici vremena. Ovakva kombinacija struje i polariteta omogućuje dobro čišćenje oksida s površine osnovnog materijala, a i penetracija je dobra. Termičko opterećenje približno je jednako na elektrodi i radnom komadu.

Zaštitni plin ovisi o vrsti osnovnog materijala i njegovoj primjeni. Plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja su [27]:

- Argon - najčešće korišteni zaštitni plin koji se primjenjuje za zavarivanje konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika, aluminija i titana,
- argon + vodik (2 % do 5%) – ta mješavina prilikom zavarivanja ima reducirajući efekt, što omogućuje bolji izgled zavora bez površinske oksidacije. Električni luk je uži, ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Nedostatak ove mješavine s dodatkom vodika je mogućnost pojave vodikom uzrokovanih pukotina i poroznosti kod aluminija,
- argon + helij (do 50%) – helij utječe na povećanje energije električnog luka što mu omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Veliki nedostatak ove mješavine je visoka cijena i poteškoće tijekom uspostavljanja električnog luka,
- argon + dušik (1 % do 3%) – zavarivanje duplex i austenitnih čelika te Ni-legura i
- argon, dušik, dušik/vodik – koriste se za zaštitu korijena zavora.

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je utvrditi utjecaj temperature predgrijavanja, unosa topline te naknadne toplinske obrade na zavarljivost čelika X3CrNiMo13-4. Prema planu pokusa, pripremljeno je 6 ploča za 3 različita stanja pokusa. Svaki od tri zavarena spoja bio je prije zavarivanja predgrijan na različitu temperaturu predgrijavanja.

Tijekom zavarivanja korišteni su podjednaki parametri te se kontrolirao unos topline u zavar. Nakon zavarivanja ploče su podvrgnute jednakoj toplinskoj obradi žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. Korišteni postupci zavarivanja i dodatni materijali u sva 3 slučaja su jednaki.

Nakon zavarivanja i toplinske obrade, iz zavarenih ploča plazma postupkom rezanja izrezane su epruvete kako bi se provela ispitivanja prema normi EN 15614-1:2004 – Specifikacija i klasifikacija postupka zavarivanja za metalne materijale – Test postupka zavarivanja – Dio 1: elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i niklovih legura. Napravljeni su i makroizbrusci za analizu geometrijskih karakteristika zavarenog spoja i za mjerenje tvrdoće HV 10. Izrezane epruvete naknadno su strojno obrađene. Svi uzorci predviđeni za zavarivanje zavareni su TIG i REL postupcima zavarivanja. Korijenski prolaz te i drugi prolaz izvedeni su TIG-om, a popuna je izvedena REL postupkom zavarivanja.

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a toplinska i strojna obrada, te mehanička ispitivanja također u pripadajućim laboratorijima na istom fakultetu.

5.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnom dijelu rada korišten je čelik X3CrNiMo13–4, debljine 10 mm. To je visokolegirani nehrđajući čelik koji spada u grupu mekomartenzitnih čelika. Navedeni čelik isporučen je u normaliziranom stanju. Temperatura normalizacije iznosila je oko 1000 °C, a vrijeme trajanja toplinske obrade iznosilo je 30 minuta. Gašenje se odvijalo na mirnom zraku.

Kemijski sastav osnovnog materijala X3CrNiMo13–4, oznake šarže F5357 te minimalne i maksimalne dozvoljene vrijednosti pojedinih kemijskih elemenata prema normi HRN EN 10088-1:2007 prikazane su u tablici 7.

Tablica 7 Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13–4 te dozvoljene vrijednosti [28]

Kemijski element [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Min.						12,0	0,30	3,5	0,020
F5357	0,026	0,37	0,72	0,025	0,000	12,9	0,55	3,8	0,033
Max.	0,050	0,70	1,50	0,040	0,015	14,0	0,70	4,5	

Mehanička svojstva koja jamči proizvođač čelika prikazana su u tablici 8.

Tablica 8 Mehanička svojstva čelika X3CrNiMo13-4 [28]

Granica razvlačenja, $R_{p0.2}$, [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća, R_m , [N/mm ²]	Tvrdoća, [HB 10]	Istezljivost, A, [%]
750	852	256	20

5.2. Dodatni materijal i zaštitni plin

Kao što je navedeno u uvodnom dijelu rada, dodatni materijal za zavarivanje martenzitnih čelika i njegovih podgrupa mora biti približno jednakog sastava kao osnovni materijal ili austenitnog tipa kako bi se osigurala dobra žilavost zavarenog spoja.

Prilikom zavarivanja ploča korištena su dva dodatna materijala, jedan za TIG i drugi za REL postupak zavarivanja. Kod TIG zavarivanja korištena je žica oznake Carbo T-4351, promjera $d_z = 2,5$ mm, koja je prije uporabe očišćena etilnim alkoholom kako bi se uklonila nečistoća s površine. Navedena žica klasificirana je kao dodatni materijal koji se koristi za zavarivanje visokolegiranih, korozijski postojanih čelika. Osim dobre korozijske postojanosti, zavar ostvaren ovim dodatnim materijalom pokazuje vrlo dobru otpornost na eroziju i kavitaciju. Mehaničke karakteristike zavara dobivenog zavarivanjem navedenim dodatnim materijalom te njegov kemijski sastav prikazani su u tablicama 9 i 10. Prema preporuci proizvođača, zaštitni plin korišten pri zavarivanju bio je argon oznake II. Riječ je o zaštitnoj atmosferi sa 100 % argona. Protok zaštitnog plina iznosio je 10 l/min. Isti zaštitni plin korišten je i za zaštitu korijena zavara. Protok plina za zaštitu korijena iznosio je 3 l/min.

Tablica 9 Mehanička svojstva zavara [29]

Granica razvlačenja, $R_{p0.2}$, [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća, R_m , [N/mm ²]	Tvrdoća, [HB 10]	Istezljivost, A, [%]
700	1100	410	15

Tablica 10 Kemijski sastav metala zavara [29]

Kemijski element [%]	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	0,06	0,7	0,6	13	4,5	0,5


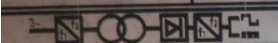


Za REL postupak zavarivanja koristile su se bazične elektrode istog proizvođača, oznake Carbo 4351 B. Mehanička svojstva i kemijski sastav metala zavara identičan je kao za dodatni materijal

kod TIG postupka zavarivanja. Promjer korištenih elektroda iznosio je $d_e = 3,2$ mm. Ovaj tip elektroda specifičan je po tome što se pri zavarivanju mogu koristiti niže struje zavarivanja. Za elektrode promjera $d_e = 3,2$ mm proizvođač dodatnog materijala preporuča korištenje struja jačine od 65 A – 110 A [29].

5.3. Zavarivanje ploča

Zavarivanje je izvedeno pomoću izvora struje CastoTig 3002 AC/DC koji ima mogućnost zavarivanja TIG i REL postupkom. Izvor struje za zavarivanje i njegova identifikacijska pločica s radnim karakteristikama prikazani su na slikama 17 a i b.



		Type: Castotig 3002 AC/DC	
CASTOLIN GMBH Kriftel / Germany		Art.Nr.	
		S.N. 17080507	
		IEC 60 974-1 EN 50 199	
		DC 3A/10,1V - 300A/22V	AC 5A/10,2V - 300A/22V
		X(40° C)	%
		65%	100%
S	U ₀	I ₂	A
	56V	U ₂	V
		300A	260A
		22V	20,4V
		U ₁	I _{1 max}
		400V	16A
		17A	14A
3~ 50-60Hz		CE	
IP 23			

Slika 17 (a) Izvor struje za zavarivanje CastoTig 3002, (b) Identifikacijska pločica izvora struje

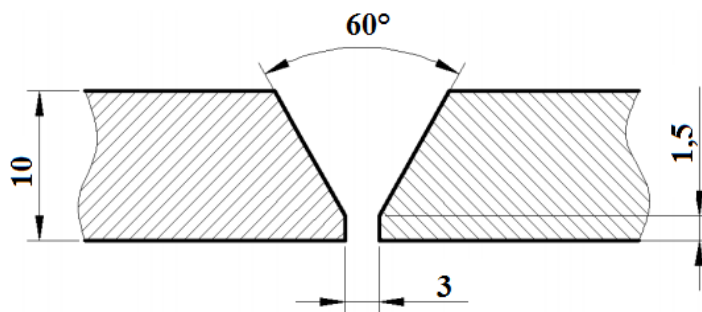
5.3.1. Priprema spoja

Priprema spoja izvedena je prema normi HRN EN ISO 9692 - 1 (2004); Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja – 1. dio: Ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje, plinsko zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje elektronskim snopom [31].

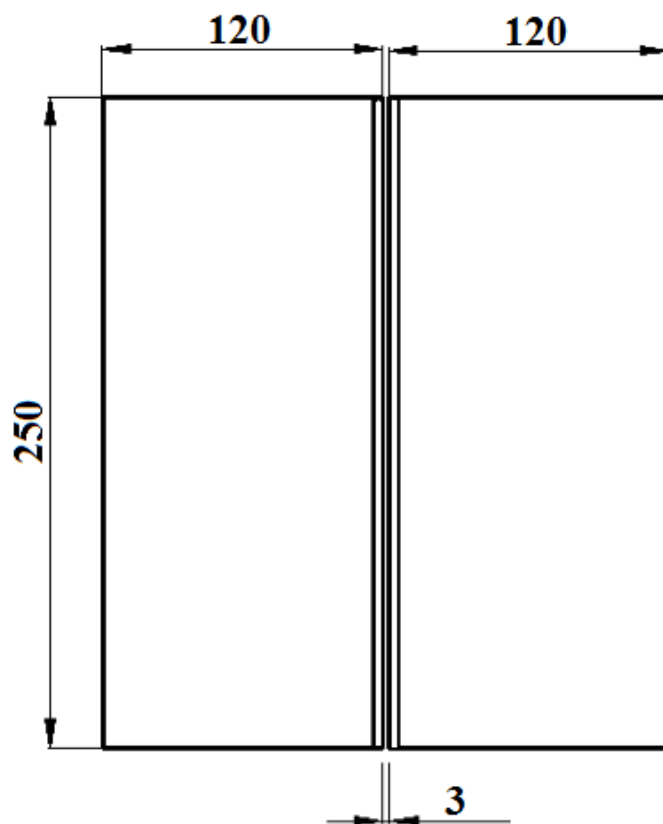
Dobra priprema spoja nužna je kako bi se ostvario kvalitetan zavareni spoj. Ukoliko bi zbog loše pripreme spoja došlo do smicanja ili prevelikog razmaka ploča, korijenski zavar bi mogao biti loše izveden. Time je upitna i kvaliteta cijelog zavarenog spoja zbog toga što ostali prolazi ovise o kvaliteti korijenskog zavara.

Ploče korištene u eksperimentu izrezane su plazma postupkom rezanja te su nakon toga strojnim obradama obrađene na zadane dimenzije.

Pripreme spojeva i dimenzije ploča prikazane su na slikama 18 i 19. Za sva tri slučaja priprema spoja bila je jednaka kao i dimenzije ploča.



Slika 18 Skica pripreme zavarenog spoja



Slika 19 Dimenzije ploča

5.3.2. Predgrijavanje

Predgrijavanje radnih komada izvodilo se plinskim plamenom uz mješavinu propan-butan i kisik, a temperatura se provjeravala laserskim termometrom. Predgrijavanje se općenito izvodi kako bi se smanjila mogućnost pojave hladnih pukotina. Na slici 20 prikazan je postupak predgrijavanja prije samog procesa zavarivanja.



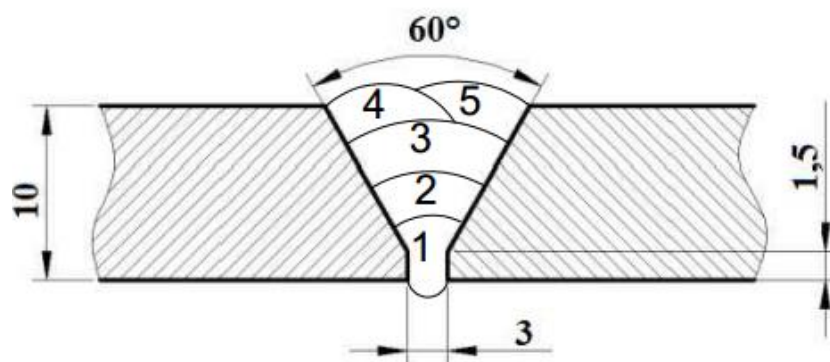
Slika 20 Predgrijavanje plinskim plamenom

Uzorak broj 1 nije bio podvrgnut predgrijavanju, uzorak broj 2 bio je predgrijan na temperaturu od 100 °C, dok je uzorak broj 3 bio predgrijan na temperaturu od 200 °C.

5.3.3. Zavarivanje različitih uzoraka

Proces zavarivanja izveden je kroz ukupno 5 prolaza. Na slici 21 shematski su prikazani prolazi prilikom zavarivanja. Kod sva 3 uzorka kontrolirala se međuprolazna temperatura laserskim termometrom.

Kod zavarivanja nehrđajućih čelika posebna pažnja se mora obratiti na unos topline u radni komad. Unos topline ne smije biti veći od 1,5 kJ/mm, ali ne smije biti ni manji od 0,5 kJ/mm, što je u ovom eksperimentu zadovoljeno.



Slika 21 Shematski prikaz slaganja prolaza prilikom zavarivanja

5.3.3.1. Uzorak 1

Ovaj uzorak nije podvrgnut toplinskoj obradi predgrijavanja, a međuprolazna temperatura iznosila je približno 30 °C. Tijekom zavarivanja ovog uzorka zbog relativno niske vrijednosti struje zavarivanja s obzirom na debljinu od 10 mm, taljenje osnovnog materijala bilo je otežano.

Na slici 22 je prikazano pozicioniranje i fiksiranje uzorka 1 prije početka zavarivanja.



Slika 22 Uzorak 1 fiksiran prije početka zavarivanja

Unos topline u zavar računa se prema jednadžbi:

$$Q = \frac{I_z \times U \times 60}{v_z \times 1000} \times k \quad (1)$$

Gdje je:

I_z – struja zavarivanja,

U – napon električnog luka,

v_z – brzina zavarivanja,

k – stupanj iskoristivosti el. luka. Za TIG iznosi 0,6, a za REL 0,8.

U tablici 11 su prikazani parametri zavarivanja uzorka 1.

Tablica 11 Parametri zavarivanja uzorka 1

Prolaz br.	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, [mm]	Jakost struje, [A]	Napon zavarivanja, [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina zavarivanja, [mm/min]	Unos topline, [kJ/mm]
1	TIG	2,5	100	11,4	DC (-)	49	0,84
2	TIG	2,5	100	11,7	DC (-)	34	1,22
3	REL	3,2	100	25	DC (+)	94	1,28
4	REL	3,2	100	25	DC (+)	166	0,72
5	REL	3,2	100	24	DC (+)	110	1,04

5.3.3.2. Uzorak 2

Temperatura predgrijavanja ovog uzorka iznosila je 100 °C, a međuprolazna temperatura iznosila je približno 100 °C. Povišenjem temperature predgrijavanja taljenje osnovnog materijala bilo je znatno jednostavnije nego kod uzorka 1. Time je i zavarivanje ovog uzorka bilo manje otežano nego kod prvog slučaja. Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 12.

Tablica 12 Parametri zavarivanja uzorka 2

Prolaz br.	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, [mm]	Jakost struje, [A]	Napon zavarivanja, [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina zavarivanja, [mm/min]	Unos topline, [kJ/mm]
1	TIG	2,5	100	11,1	DC (-)	43,2	0,95
2	TIG	2,5	100	11,5	DC (-)	45,5	0,87
3	REL	3,2	100	25,6	DC (+)	93	1,31
4	REL	3,2	100	26	DC (+)	160	0,70
5	REL	3,2	100	26,5	DC (+)	130	0,96

5.3.3.3. Uzorak 3

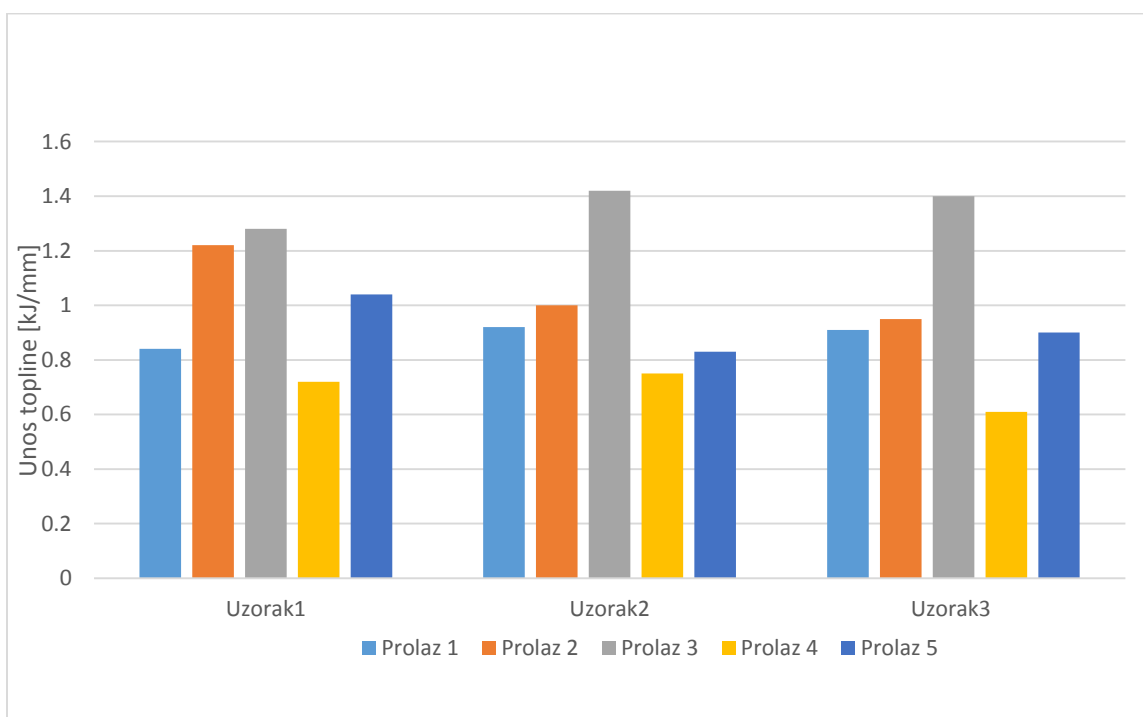
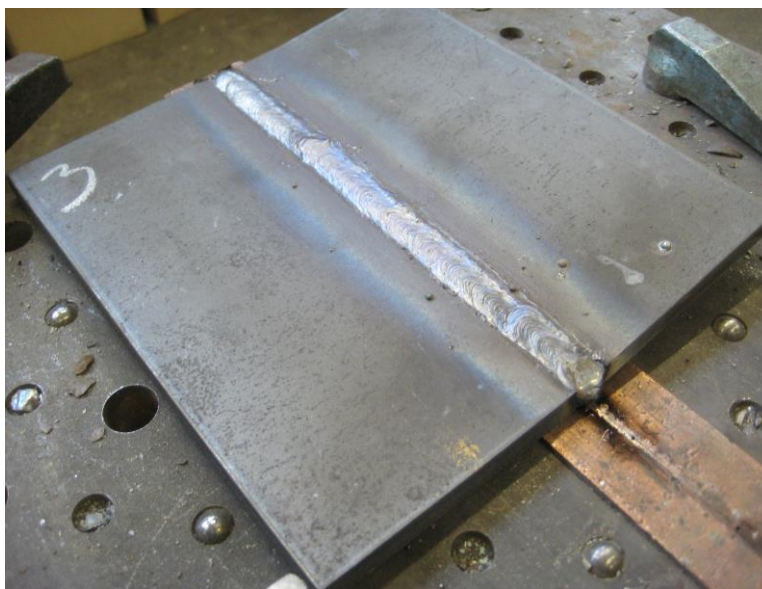
Uzorak 3 predgrijan je na temperaturu od 200 °C, a međuprolazna temperatura održavala se na približno 200 °C. Zbog veće temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature koje su omogućile kvalitetnije taljenje osnovnog materijala, zavarivanje ovog uzorka bilo je još jednostavnije nego u prethodnom slučaju.

Parametri zavarivanja uzorka 3 prikazani su u tablici 13.

Tablica 13 Parametri zavarivanja uzorka 3

Prolaz br.	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala, [mm]	Jakost struje, [A]	Napon zavarivanja, [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina zavarivanja, [mm/min]	Unos topline, [kJ/mm]
1	TIG	2,5	100	11,4	DC (-)	43,7	0,91
2	TIG	2,5	100	11	DC (-)	39,8	1
3	REL	3,2	100	25,5	DC (+)	86,3	1,4
4	REL	3,2	100	26	DC (+)	190	0,64
5	REL	3,2	100	26,2	DC (+)	150	0,83

Na slici 23 a) prikazan je uzorak 3 nakon završetka zavarivanja, a na slici 23 b) grafički je prikazan unos topline u zavar tijekom zavarivanja.

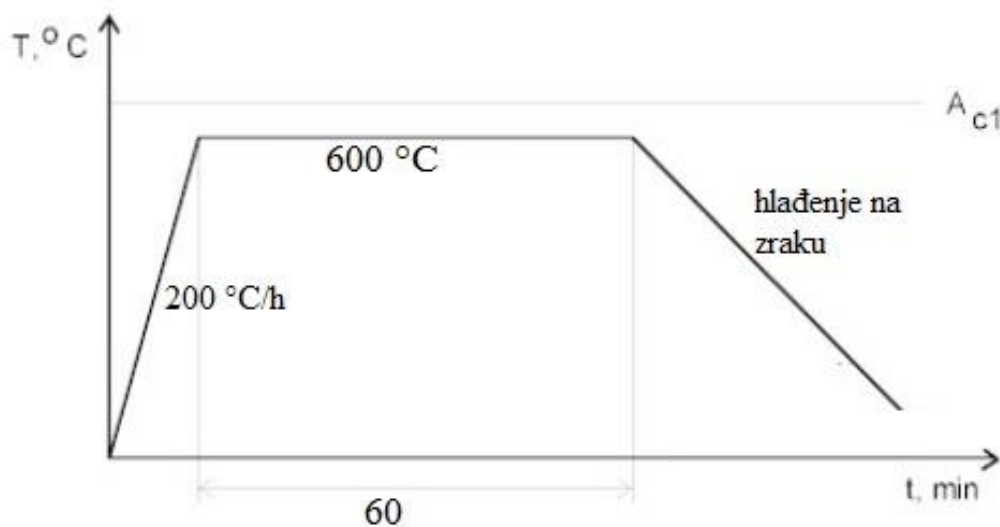


Slika 23 (a) Uzorak 3 nakon posljednjeg prolaza, (b) Grafički prikaz unosa topline u zavar

5.4. Toplinska obrada nakon zavarivanja

Žarenje za sniženje zaostalih naprezanja u zavarenom spoju čeličnih proizvoda je postupak grijanja radnog komada na temperaturu u području između 550 °C i 650 °C. Na toj se temperaturi zavareni spoj ili cijeli radni komad drži određeni vremenski interval, a zatim hladi do sobne temperature. Mehanizam djelovanja ove toplinske obrade je relativno jednostavan. Pri povišenim temperaturama snizuje se granica razvlačenja, a u tako plastičnom stanju materijala dobrim dijelom nestaju naprezanja nastala zavarivanjem. Naprezanja ne nestaju u potpunosti, jer se snižavaju do iznosa granice razvlačenja pri primjenjenoj temperaturi žarenja.

Nakon obavljenog zavarivanja, ploče su puštene da se ohlade na zraku do sobne temperature te su zatim podvrgnute toplinskoj obradi žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. Ploče su zagrijane na temperaturu od 600 °C na kojoj su držane 60 minuta, a zatim su ohlađene na zraku do sobne temperature. Na slici 24 prikazan je dijagram provedene toplinske obrade.

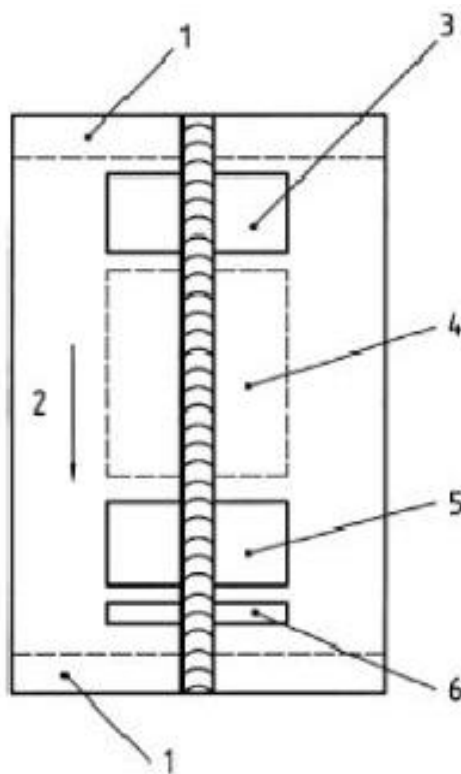


Slika 24 Dijagram toplinske obrade

5.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva

5.5.1. Izrada uzoraka za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih uzoraka, izrađeni su ispitne epruvete za savijanje, epruvete za statički vlačni pokus te makroizbrusci na kojima je mjerena tvrdoća. Epruvete su izrezane iz ploča prema normi HRN EN ISO 15614-1 (slika 25), te su strojno obrađeni prema zadanim dimenzijama. Za izradu epruveta za statičko vlačno ispitivanje korištena je norma EN 895:1995, a za izradu epruveta za savijanje korištena je norma DIN EN 910 [31,32,33].



Slika 25 Pozicije izrezivanja uzoraka (1 – odbacivanje 25 mm, 2 – smjer zavarivanja, 3,5 – epruvete za statički vlačni pokus, 6 – makroizbrusak) [31]

Za svako stanje pokusa predviđeno je jedno ispitivanje, tako da je za statičko vlačno ispitivanje i izrezana po jedna epruveta iz svakog uzorka. Za ispitivanje savijanjem su izrezane po dvije epruvete iz svakog uzorka, a za mjerenje tvrdoće i makroanalizu iz svakog uzorka je napravljen jedan makroizbrusak.

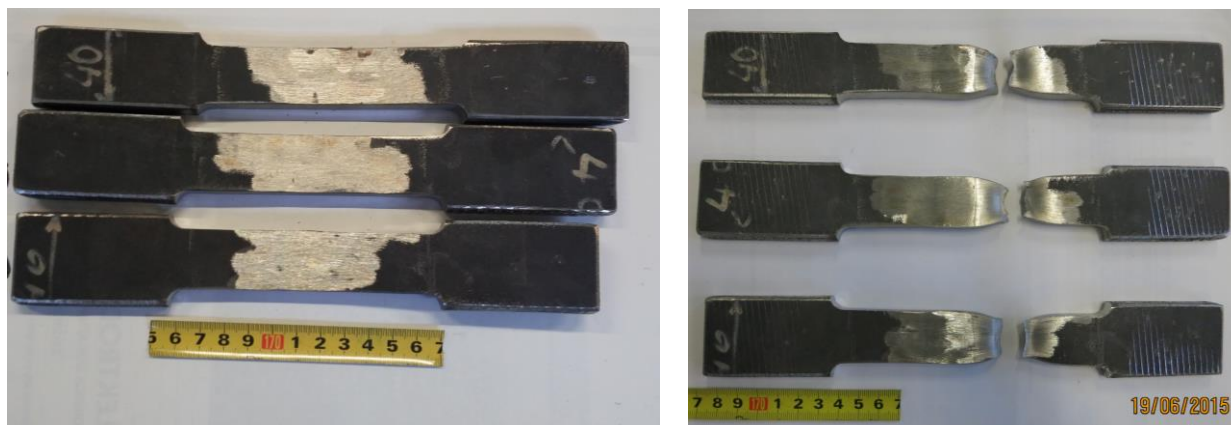
5.5.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Ovim se ispitivanjem ujedno određuju i osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i dr.

Statičko vlačno ispitivanje zavarenih spojeva provedeno je prema normi EN 895:1995 u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala FSB-a. Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, na kojima se epruvete kontinuirano opterećuju sve do loma. Model kidalice na kojoj se provodilo ispitivanje je EU 40 mod, a maksimalna sila koju može upotrijebiti iznosi 400 kN. Na slici 26 prikazana je epruveta u kidalici [32].



Slika 26 Kidalica EU 40 mod s epruветom



Slika 27 Ispitne epruvete prije i nakon provođenja ispitivanja

Dimenzije epruveta određene su u skladu s normom EN 895. Epruveta je širine 37 mm sa suženjem vrata od 25 mm i prijelaznim radijusima 25 mm. Dužina vrata epruvete iznosi 100 mm, a ukupna dužina epruvete je 250 mm [32].

Statičkim vlačnim pokusom ispitane su tri epruvete izvađene iz zavarenih ploča. Na slici 27 prikazane su epruvete prije i nakon provedenog ispitivanja. Vrijednosti dobivene navedenim ispitivanjem prikazane su u tablici 14.

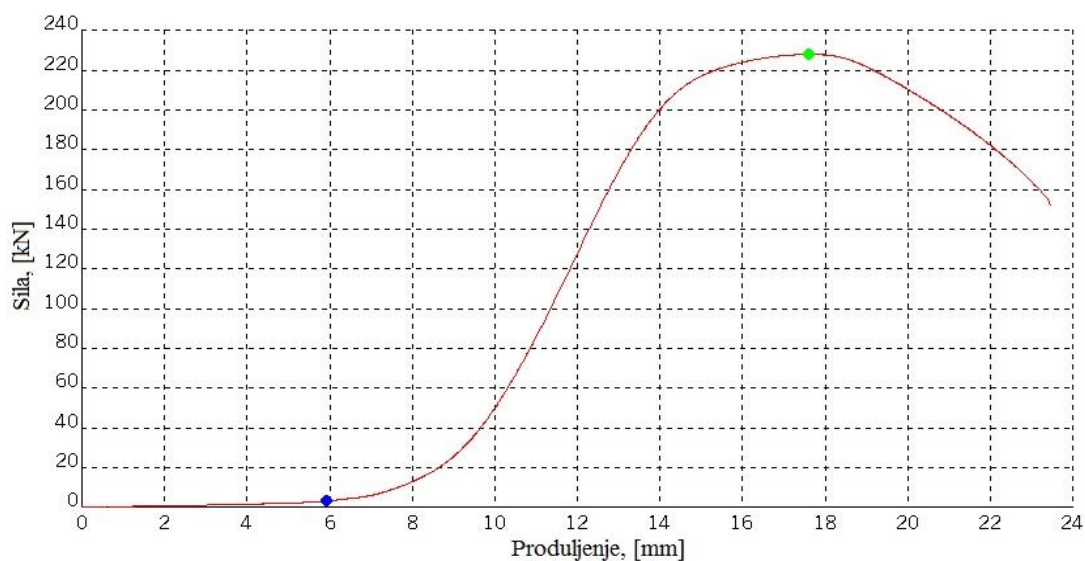
Tablica 14 Vrijednosti dobivene statičkim vlačnim pokusom

Epruveta broj	Vlačna čvrstoća, R_m , [N/mm ²]	Maksimalna sila, F_m , [kN]	Prekidna sila, F_k , [kN]	Mjesto pukotine
1	864	228	151,2	ZUT
2	857	226,5	146	ZUT
3	840	226,1	147,5	ZUT

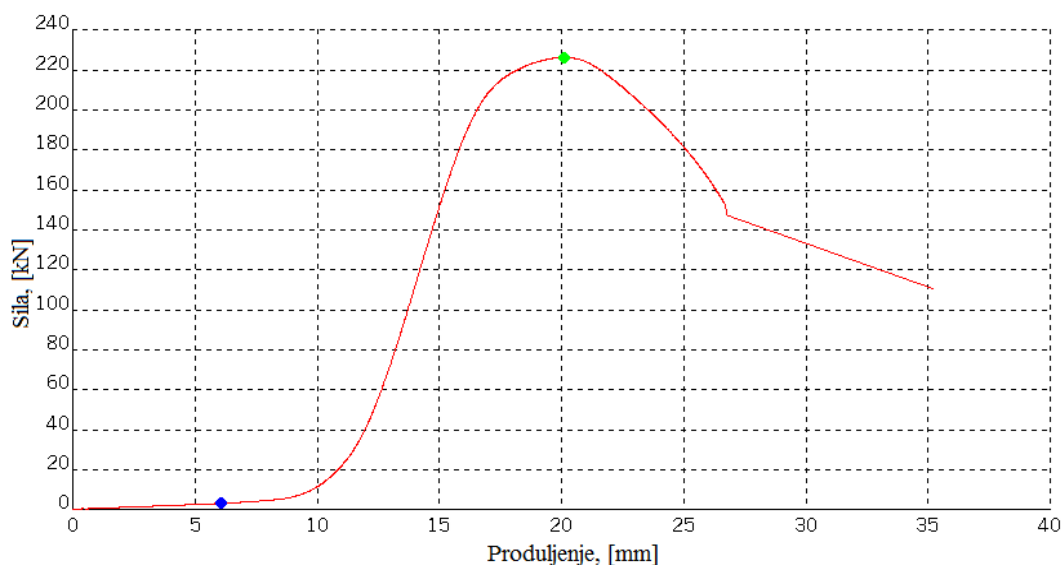
Nakon provedenog ispitivanja utvrđeno je da su svi uzorci puknuli u zoni utjecaja topline. S obzirom na to da su svi ispitni uzorci puknuli u području ZUT-a ne može se odrediti vlačna čvrstoća metala zavora, no moguće je zaključiti kako je ona veća od vlačne čvrstoće osnovnog materijala kao što je i navedeno u atestu dodatnog materijala [28]. Mjesto zavarenog spoja na ispitnim uzorcima nije predstavljalo mjesto slabijih mehaničkih svojstava od svojstava osnovnog materijala.

Vrijednosti vlačne čvrstoće kod uzorka 1 i 2 su iznad vrijednosti koju jamči proizvođač, dok je R_m kod uzorka 3 nešto manji. Ta vrijednost i dalje ulazi u granice dopuštenog iznosa vlačne čvrstoće za ovaj čelik koja iznosi od 780 N/mm^2 do 980 N/mm^2 .

Na slikama 28 i 29 prikazani su dijagrami „sila – produljenje“ epruveta broj 1 i 3, dobiveni statičkim vlačnim ispitivanjem.



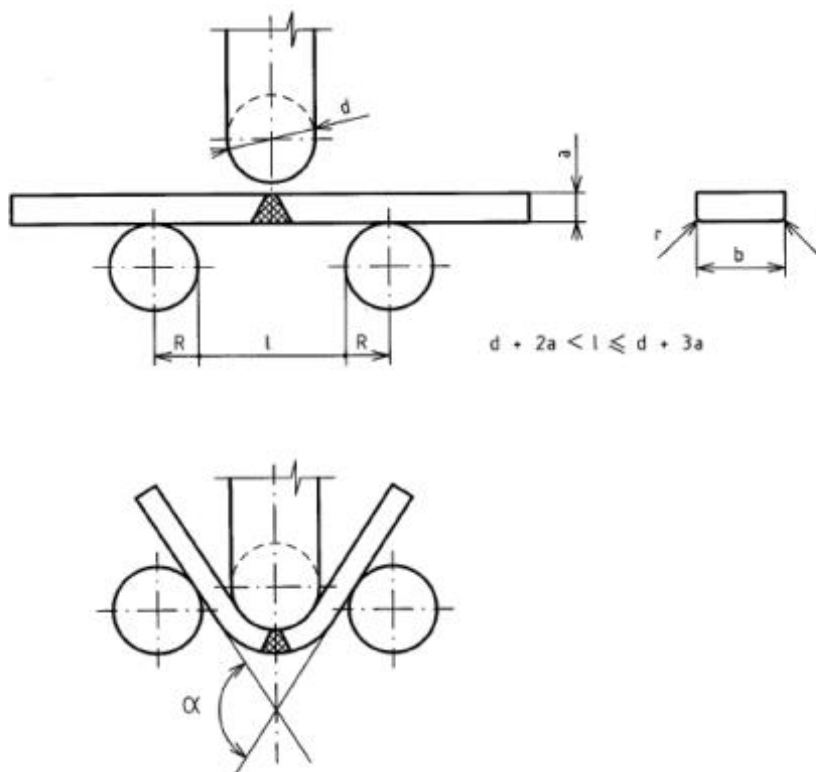
Slika 28 Dijagram „sila - produljenje“ za epruvetu 1



Slika 29 Dijagram „sila - produljenje“ za epruvetu 3

5.5.3. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem izvedeno je savijanjem uzoraka na korijen zavora i savijanjem na lice zavora prema normi DIN EN 910. Pripremljeno je 6 uzoraka, po dva za svako stanje pokusa. Prema normi promjer trna mora iznositi 4 x debljina materijala, što u ovom slučaju iznosi 40 mm. Razmak između oslonca l (valjaka) prema normi treba iznositi 60 mm kao što je prikazano na slici 30 [33].

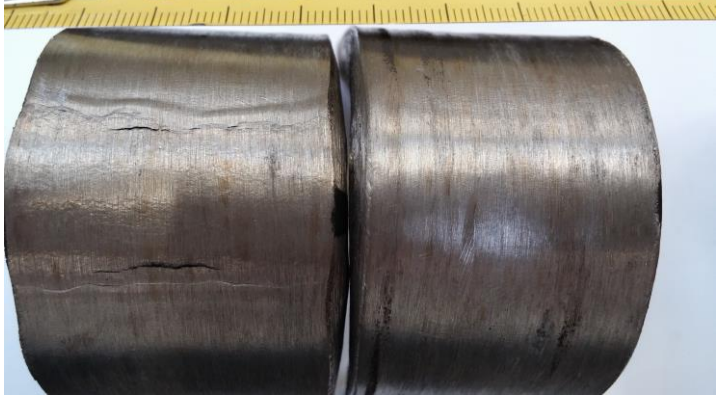




Slika 30 Postupak savijanja prema DIN EN 910 [33]

Nakon rezanja epruveta plazma postupkom slijedila je priprema za savijanje pomoću brusnih ploča kojima su se skidala nadvišenja korijena i lica zavora na epruvetama. Širina epruveta je 40 mm a duljina 250 mm. Epruvete su savijane na kut od 180° , a pritom se dodirom pratilo dolazi li do pojave pukotina.

U tablici 15 je prikazan izgled zavora kod epruveta nakon što se izvršio pokus savijanja na korijen i na lice zavora. Epruvete savijane na lice nalaze se s lijeve strane, a s desne strane se nalaze epruvete savijane na korijen zavarenog spoja.

Tablica 15 Rezultati ispitivanja na savijanje

Analiza epruveta	Izgled lica i korijena zavora nakon savijanja
<p>Kod epruveta napravljenih iz uzorka 1, koji nije podvrgnut predgrijavanju došlo je to pojave pukotine pri savijanju na lice zavora. Pukotine su nastale u metalu zavora uz obje strane linije staljivanja.</p> <p>Uzorak 1 nije zadovoljio ispitivanje.</p>	
<p>Epruvete napravljene iz uzorka 2 koji je predgrijan na temperaturu predgrijavanja, $T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ u potpunosti su zadovoljile ispitivanje savijanjem. Nije došlo do pojave pukotina.</p> <p>Uzorak 2 je zadovoljio ispitivanje.</p>	
<p>Epruvete napravljene iz zavarenog spoja koji je predgrijan na temperaturu predgrijavanja $T_p = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ u potpunosti su zadovoljile ispitivanje savijanjem. Nije došlo do pojave pukotina.</p> <p>Uzorak 3 je zadovoljio ispitivanje.</p>	

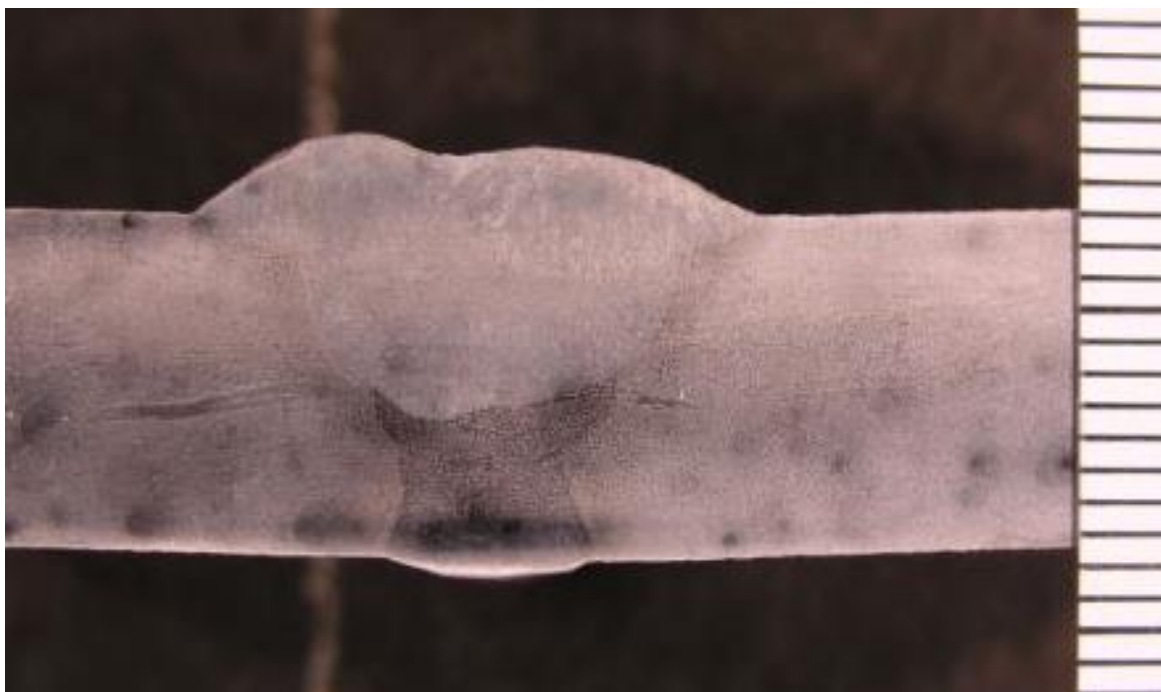
5.5.4. Geometrijska analiza makroizbrusaka

Iz zavarenih spojeva izrađeni su makroizbrusci kako bi se mogla provesti geometrijska analiza zavora i mjerenje tvrdoće.

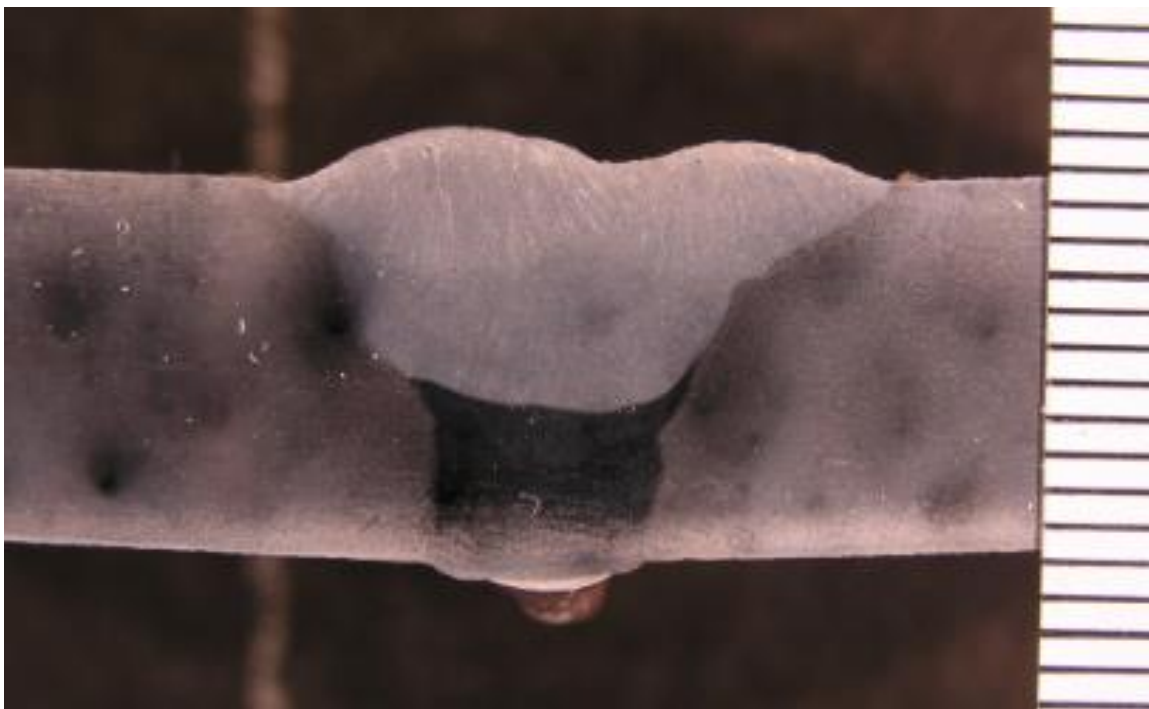
Izrada makroizbrusaka zahtijevala je više različitih strojnih obrada. Prvo su se plazma postupkom izrezale epruvete iz zavarenih uzoraka. Zatim su epruvete rezanjem na tračnoj pili uz hlađenje vodom dovedene do zadanih dimenzija. Nakon toga je slijedila gruba obrada brušenjem na stupnoj brusilici kako bi se poravnale površine i skinuo srh. Sljedeći korak u pripremi makroizbrusaka proveden je u Laboratoriju za materijalografiju a sastojao se od brušenja makroizbrusaka na stroju za brušenje i poliranje. Korišteni su brusni papiri finoće od P320 do P4000. Nakon toga je slijedilo elektrolitičko nagrizanje makroizbrusaka u 10 % oksalnoj kiselini.

Kod makrostrukturnih ispitivanja izmjerene su nadvišenja i širine lica zavora.

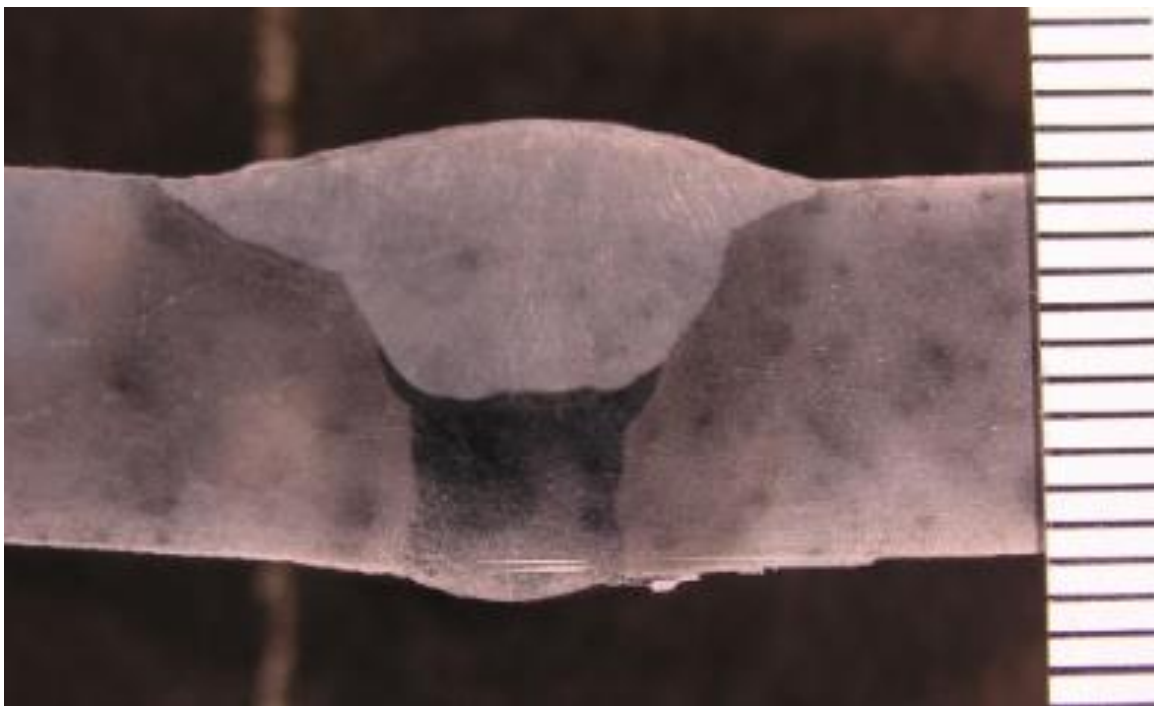
Na slikama 31,32,33 prikazani su poprečni presjeci makroizbrusaka.



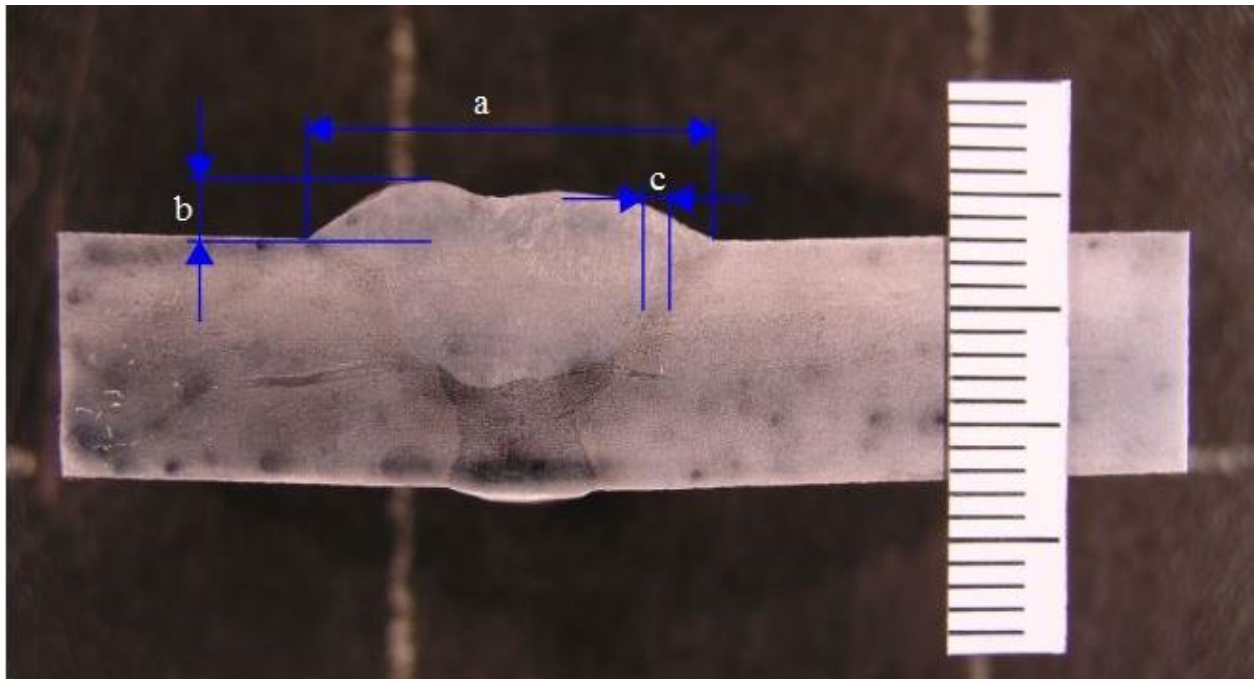
Slika 31 Makroizbrusak uzorka1



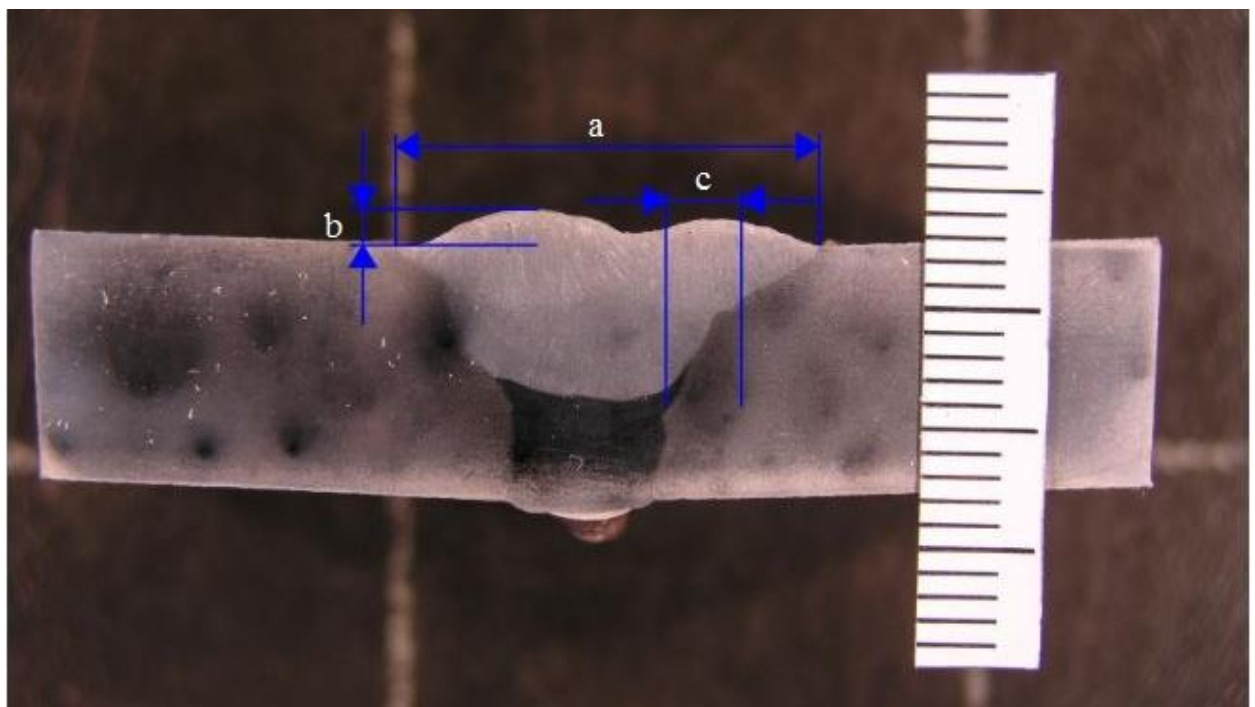
Slika 32 Makroizbrusak uzorka 2



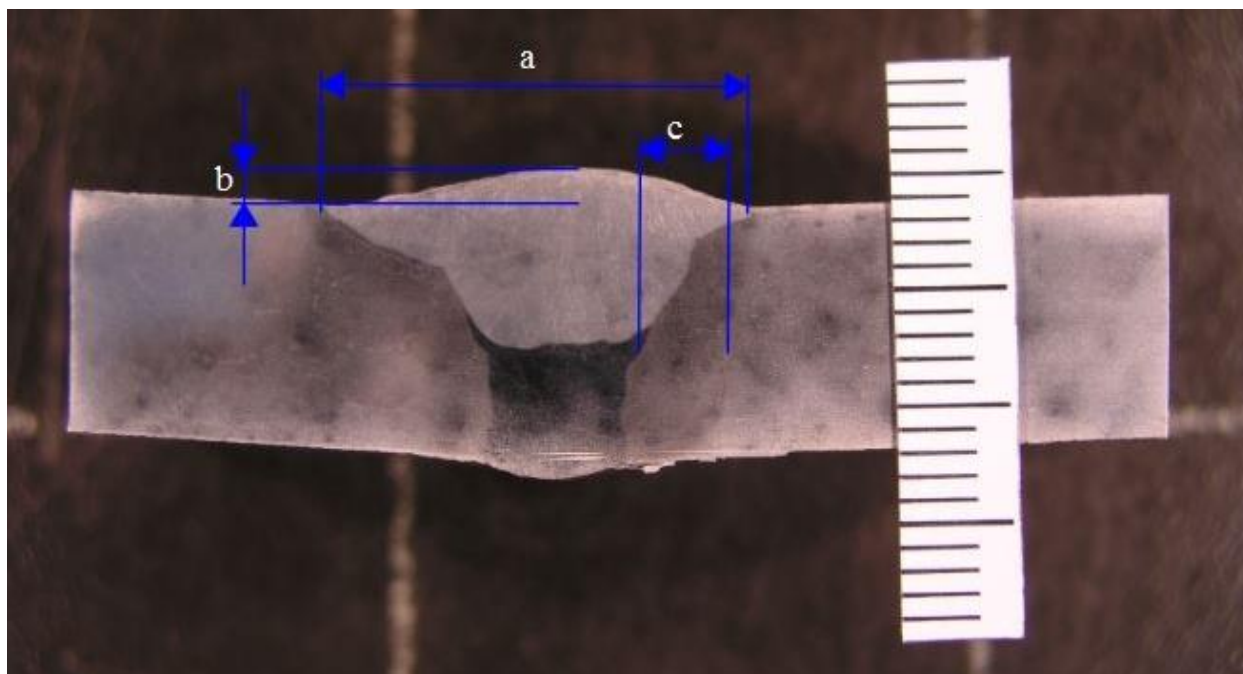
Slika 33 Makroizbrusak uzorka 3



Slika 34 Makroizbrusak uzorka 1 s kotama



Slika 35 Makroizbrusak uzorka 2 s kotama



Slika 36 Makroizbrusak uzorka 3 s kotama

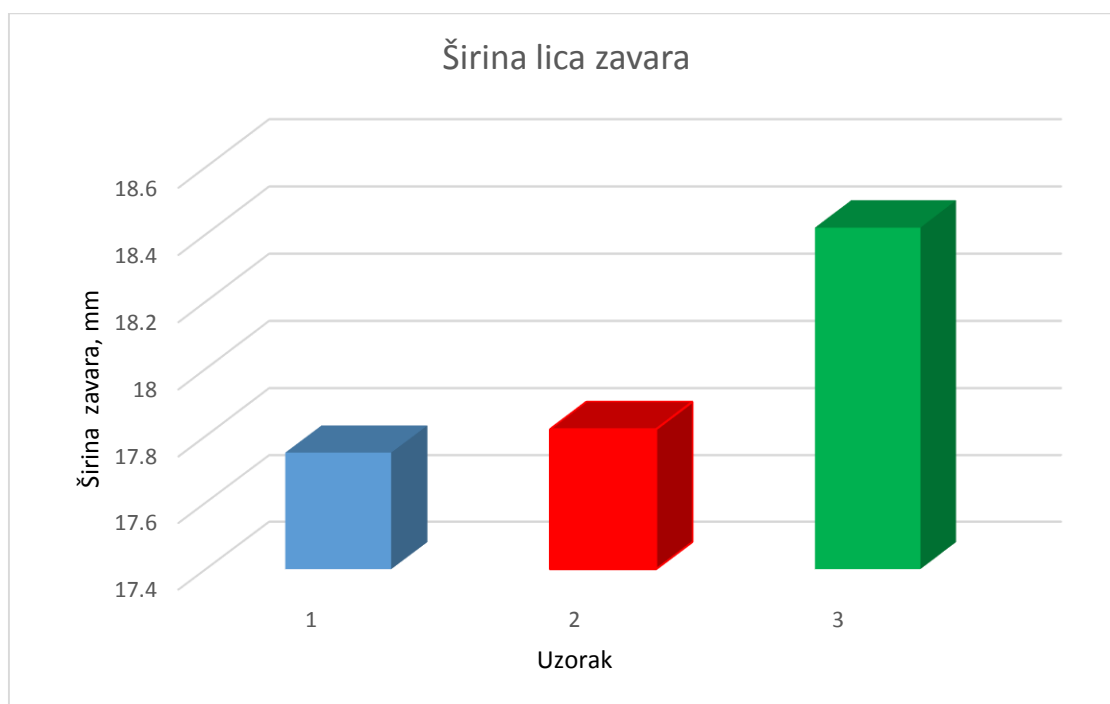
Na slikama 34, 35 i 36 prikazani su makroizbrusci s kotama. Vizualnom kontrolom makroizbrusaka zavarenih spojeva niti na jednom uzorku nije uočena pojava grešaka. U tablici 16 dan je prikaz izmjerenih vrijednosti.

Tablica 16 Geometrijske značajke makroizbrusaka

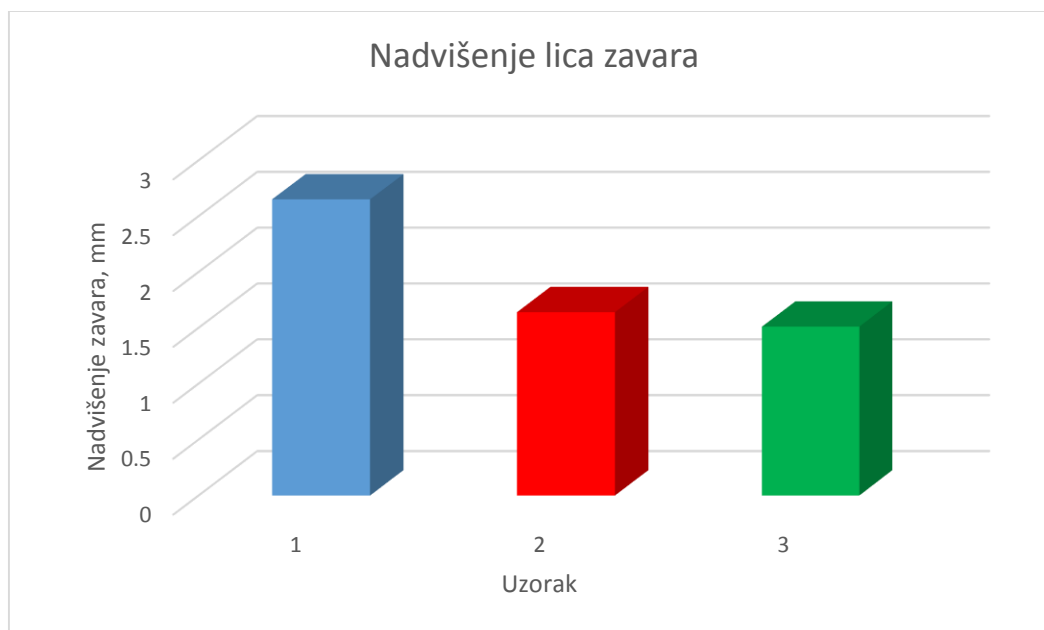
Uzorak	a, [mm]	b, [mm]	c, [mm]
1	17,75	6,69	1,2
2	17,82	6,15	3
3	18,42	5,99	3,9

Na slikama 37, 38 i 39 grafički su prikazani rezultati mjerenja širine i nadvišenja metala zavara te širine ZUT-a za sva tri uzorka. Sa slike 37 se može uočiti kako je kod uzorka 3 koji je predgrijan na temperaturu predgrijavanja $T_p = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ širina lica zavara veća u odnosu na ostala dva uzorka,

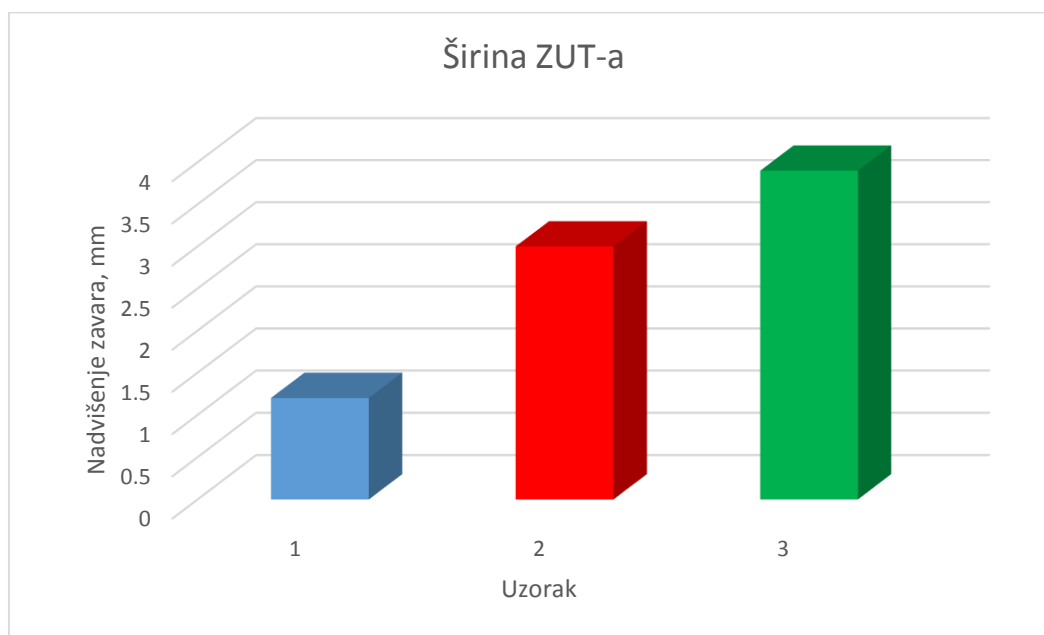
a nadvišenje zavara je kod tog uzorka najniže (slika 38). Razlog tome je što pri većoj temperaturi predgrijavanja dolazi do lakšeg taljenja osnovnog materijala i miješanja dodatnog materijala s osnovnim, a time se povećava i brzina zavarivanja. S porastom temperature predgrijavanja raste i širina ZUT-a



Slika 37 Grafički prikaz širina lica zavara



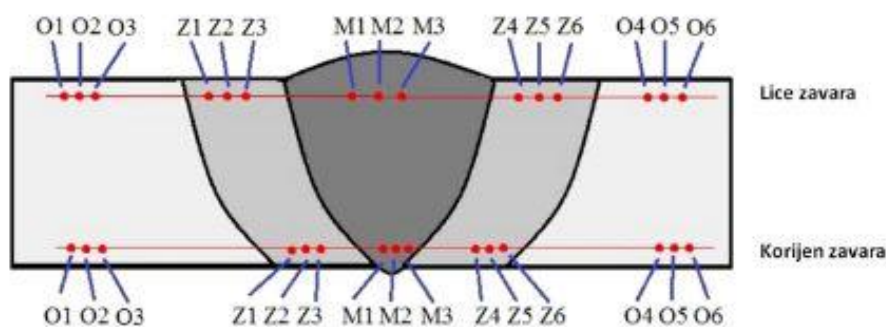
Slika 38 Grafički prikaz nadvišenja lica zavora



Slika 39 Grafički prikaz širine ZUT-a

5.5.5. Mjerenje tvrdoće zavarenog spoja

Za ispitivanje tvrdoće u ovom eksperimentu korištena je metoda po Vickersu (HV 10) uz primjenu sile od 10 kiloponda ili 98,04 N. Trajanje utiskivanja opterećenja bilo je 10 s. Kod Vickersove metode tvrdoća se određuje veličinom otiska kojeg dijamantni indentor u obliku istostrane četverostrane piramide s kutom od 136° između nasuprotnih stranica ostavi na ispitivanom materijalu. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, metalu zavara i u zoni utjecaja topline, prema shemi na slici 40. Na svakom uzorku napravljeno je 30 mjerenja, u dvije linije po 15 mjerenja. Udaljenost između mjernih točaka je približno 0,5 mm.



Slika 40 Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju

U tablicama 17 – 19 su prikazani rezultati mjerenja tvrdoća korijena zavarava i lica zavarava sva tri uzorka.

Tablica 17 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 1

Uzorak 1				
Lice zavarava			Korijen zavarava	
Mjerna točka	HV10	Max. HV10	HV10	Max. HV10
O1	292	292	283	292
O2	287		292	
O3	281		281	
Z1	322	325	302	306
Z2	319		297	
Z3	325		306	

M1	309	309	322	339
M2	306		287	
M3	302		339	
Z4	299	299	297	304
Z5	285		304	
Z6	299		294	
O4	274	279	285	292
O5	279		292	
O6	274		289	

Tablica 18 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 2

Uzorak 2				
Lice zavara			Korijen zavara	
Mjerna točka	HV10	Max. HV10	HV10	Max. HV10
O1	274	276	270	270
O2	276		270	
O3	274		268	
Z1	299	299	299	304
Z2	289		304	
Z3	294		297	
M1	341	342	295	304
M2	342		304	
M3	325		304	
Z4	309	322	310	310
Z5	304		304	
Z6	322		302	
O4	289	289	285	285
O5	285		285	
O6	285		283	

Tablica 19 Vrijednosti izmjerenih tvrdoća uzorka 3

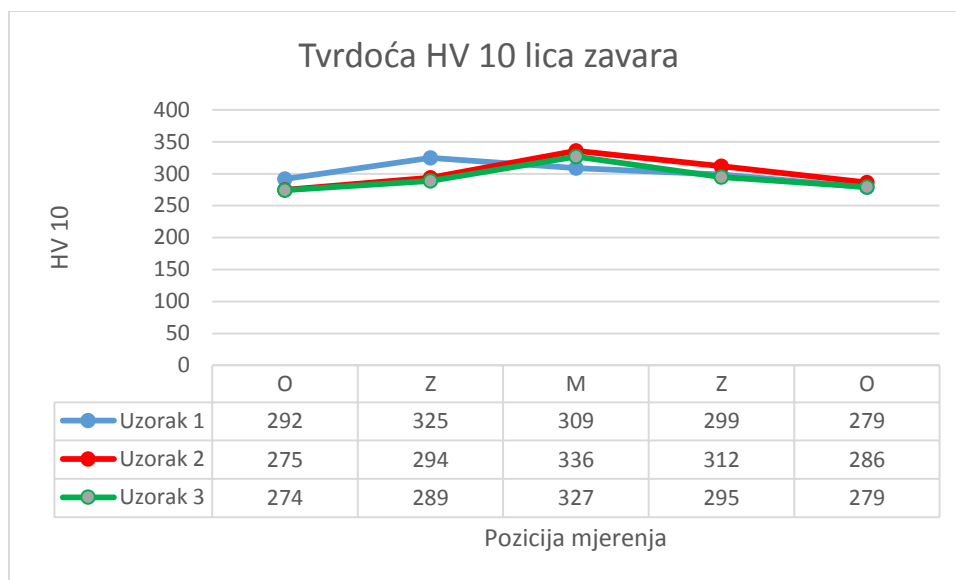
Uzorak 3				
Lice zavara			Korijen zavara	
Mjerna točka	HV10	Max. HV10	HV10	Max. HV10
O1	272	285	266	268
O2	266		264	
O3	285		268	

Z1	289	289	297	297
Z2	289		285	
Z3	289		285	
M1	336	336	281	287
M2	322		283	
M3	322		287	
Z4	297	299	285	285
Z5	289		283	
Z6	299		281	
O4	274	283	276	281
O5	281		268	
O6	283		281	

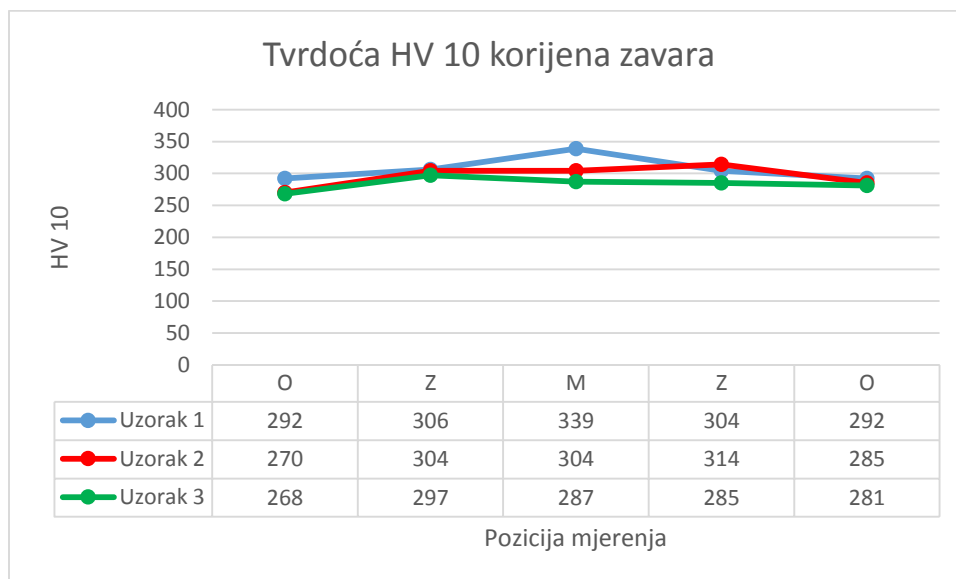
Iz svakog od tri mjerenja po poziciji uzeta je najveća vrijednost izmjerene tvrdoće te su na slici 41 dani profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća na licu zavora, a na slici 42 dani su profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća u korijenu zavora.

Čelik X3CrNiMo13–4 prema normi HRN EN ISO 15614-1 pripada grupi čelika pod oznakom 7. Za tu grupu čelika u normi nije određena maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće zavorenog spoja, već se mora kontrolirati postoje li neka značajnija odstupanja od izmjerenih vrijednosti [31].

Kao što se može vidjeti iz prethodnih tablica i iz histograma, najveća izmjerena tvrdoća je u metalu zavora na uzorku 1, u korijenu zavora, dok je kod lica zavora najveća tvrdoća u metalu zavora uzorka 3. Uspoređujući tvrdoće osnovnog materijala i zone utjecaja topline sva tri uzorka, može se uočiti kako nema značajnih odstupanja tvrdoća kod uzoraka.



Slika 41 Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća lica zavara



Slika 42 Grafički prikaz vrijednosti tvrdoća korijena zavara

6. ZAKLJUČAK

Martenzitni nehrđajući čelici svojim povoljnim svojstvima pronašli su primjenu u različitim granama industrije, kao što su npr. izrada lopatica parnih, plinskih i mlaznih turbina, izrada parnih cjevovode, vodnih turbina, cijevi i ventila u rafinerijama nafte i sl.

Zavarivanje martenzitnih čelika i njegovih podskupina zahtjeva toplinske postupke prije i poslije postupka zavarivanja. Predgrijavanje se provodi kako bi se smanjio nepovoljni učinak toplinskih naprezanja pri stezanju, jer se smanjuje razlika temperature zavara i osnovnog materijala. S većim temperaturama smanjuje se i mogućnost pojave vodikovih pukotina zbog izlaska difuzijskog vodika iz zavara.

Temeljem provedenih ispitivanja i analize moguće je zaključiti:

- S višom temperaturom predgrijavanja povećava se brzina zavarivanja zbog intenzivnijeg miješanja osnovnog i dodatnog materijala.
- Zavareni spojevi kod kojih se koristilo predgrijavanje zadovoljili su sva provedena ispitivanja. Kod uzorka koji nije predgrijan prilikom ispitivanja savijanjem došlo je do pojave pukotina na licu zavara pokraj linije staljivanja u metalu zavara.
- Prilikom statičkog vlačnog ispitivanja sve epruvete su puknule u ZUT-u što znači da su mehanička svojstva zavara kod sva tri uzorka bolja od osnovnog materijala.
- Geometrijskom analizom makroizbrusaka uočeno je kako s porastom temperature predgrijavanja širina ZUT-a raste.

Uzevši u obzir dobivene rezultate preporuča se korištenje predgrijavanja prije zavarivanja i toplinske obrade nakon zavarivanja kako bi zavareni spojevi zadovoljili eksploatacijske zahtjeve.

Za bolje rezultate preporučuju se daljnja istraživanja i ispitivanja s više različitih temperatura predgrijavanja u temperaturnom rasponu od 100 °C – 200 °C. Uz mehanička ispitivanja provedena u ovom radu, svakako bi trebalo ispitati i udarni rad loma te mikrostrukturu zavara.

7. LITERATURA

- [1] <http://www.ossberger.de/cms/en/home/>; dostupno 21.4.2015.
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.; Svojstva i primjena materijala; FSB, Zagreb, 2001.
- [3] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.; Zavarivanje Cr – Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje; 4. Seminar, Čelici otporni na koroziju; Pula, 2007.
- [4]; Norma ISO 581:2005; Weldability - Metallic materials - General principles.
- [5] Garašić, I.; Zavarljivost osnovna načela; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [6] Kuzman, V; Utjecaj parametara zavarivanja na mikrostrukturu zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće (diplomski rad); Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012.
- [7] Juraga, I.; Zavarivanje čelika otpornih na koroziju; Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [8]; Norma HRN EN 10088-1:2007; Nehrdajući čelici - 1. dio: Popis nehrđajućih čelika.
- [9] Lukačević, Z.; Zavarivanje; Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998.
- [10] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1385038346-0-ssnc_5i6_pred_tekst.pdf; dostupno 26.6.2015.
- [11] Kožuh, S.; Skripta - Specijalni čelici; Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [12] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf; dostupno 26.6.2015.
- [13] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1383571615-0-ssnc_3i4_pred_tekst.pdf; dostupno 21.4.2015.
- [14] ASM Handbook; Volume 6, Welding, Brazing and Soldering; ASM International, 1993.
- [15] Lippold, J.C., Kotecki, D.J.; Welding metallurgy and weldability of stainless steels; John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [16] ASM Handbook; Volume 4, Heat Treating; ASM International, 1991.

- [17] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/to_obr.html; 21.04.2015.
- [18] Šolić, S.; Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata (doktorski rad); Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [19] Novosel, M., Krumes, D.; Posebni čelici; Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998.
- [20] Novosel, M.; Martenzitni čelici s niskim udjelom ugljika; Materijali u strojarstvu, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1993.
- [21] Juraga, I., Gracin, M., Živčić, M.; Reparturno zavarivanje; Vlastita naklada, Zagreb, 1994.
- [22] Gooch, T.G.; Heat Treatment of Welded 13 %Cr – 4 %Ni Martensitic Stainless Steel for Sour Service; Welding Research, Supplement to the Welding Journal, 1995.
- [23] Horvat, M., Bilić, M., Kondić, V.; Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija; Tehnički glasnik 7, 2013.
- [24] Garašić, I.; REL zavarivanje, autorizirana predavanja; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [25] Kralj, S., Andrić, Š.; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [26] Čolić, L.; Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom (diplomski rad); Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- [27] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.; Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja; Tehnički glasnik 8, 2014.
- [28] Atest osnovnog materijala, Arcelor Mittal.
- [29] Atest dodatnog materijala, Carbo Weld.
- [30]; Norma HRN EN ISO 9692 - 1 (2004); Zavarivanje i srodni postupci – Preporuke za pripremu spoja – 1. dio: Ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje, plinsko zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje elektronskim snopom.

[31]; Norma HRN EN ISO 15614-1; Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla.

[32]; Norma EN 895:1995; Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test

[33]; Norma DIN EN 910; Razorna ispitivanja zavara metalnih materijala – Test savijanja.